

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Dinâmica de Vórtices na Corrente dos Açores sobre a Crista Média Atlântica

Susana Margarida Martins Fernandes de Azevedo e Silva

Mestrado em Ciências Geofísicas
Especialização em Oceanografia

Dissertação orientada por:
Prof. Doutor Álvaro Peliz

2017

*A ti por nunca me teres deixado desistir
e a mim por nunca o ter feito...*

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, o professor Álvaro Peliz, por todo o incentivo, disponibilidade e paciência não só no decorrer desta tese, bem como nas disciplinas que me lecionou. Muito obrigada por me ter dado a oportunidade de ter trabalhado consigo.

Em segundo lugar quero agradecer ao grupo de oceanografia Ana, Sandra e professor Álvaro por me terem feito sentir tão bem-vinda.

Ao professor José Teixeira da Silva o meu agradecimento por ter acreditado em mim e por me ter dado a oportunidade para trabalhar no meu primeiro projeto de investigação.

Ao professor Josep Batlló, meu orientador no projeto de licenciatura, quero agradecer por toda a ajuda na conclusão daquela etapa da minha vida.

Ao professor Edgar Cravo obrigada por ter sempre exigido mais de mim nas suas aulas, pelos conselhos e amizade.

Quero também agradecer a todos os meus professores de mestrado pelas “discussões” intermináveis que tanto contribuíram para enriquecer o meu conhecimento.

Aos colegas de laboratório/almoço Ana, Caldeirinha, Inês, João, Miguel, Pedro, Rita e Sandra, muito obrigado pelas toneladas de risos.

À Caldeirinha, à Lili e à Mariana muito obrigada por todo o apoio, companheirismo e amizade nestes três anos que pareceram uma eternidade...

Ao meu grupo de amigos Dina, David, Francisco, Isaac, Maggy, Pedro e Tiago, obrigada pelo apoio e por estarem sempre lá...

Aos meus sogros Firmino e Mariana o meu profundo agradecimento por todo o carinho...

Aos meus pais António e Maria Dulce, quero agradecer por me incentivarem e acreditarem que eu consigo sempre chegar mais longe. Aos meus irmãos Ricardo e Noemi por simplesmente existirem e fazerem parte da minha vida...

E por fim, quero agradecer ao Marco Nóvoas que me acompanha e acompanhou sempre no meu longo caminho, que atura todos os meus momentos, bons e maus, e que nunca me deixa desistir... Obrigada...

Esta tese foi realizada como parte integrante do projeto “BIOMETORE – Biodiversity in seamounts: the Madeira-Tore and Great Meteor”, financiada pela EEA Grants.

Resumo

A Corrente dos Açores é a estrutura de circulação mais importante no Atlântico Norte Subtropical. A evolução dos meandros associados à corrente origina a formação de vórtices, tendo estes uma importância elevada nos fluxos de momento e calor no oceano, bem como no transporte de nutrientes ao longo de grandes distâncias. Ao propagarem-se no oceano para além da interação com outros vórtices, estas estruturas podem interagir com a topografia, alterando significativamente o seu trajeto ou mesmo causando a sua erosão total. A Crista Média Atlântica (MAR) possui uma batimetria bastante pronunciada com profundidades aproximadas das da própria corrente dos Açores. No entanto, a influência da topografia na corrente média e nas estruturas turbulentas na zona da corrente dos Açores é praticamente desconhecida. Neste estudo é feita uma caracterização das estruturas de mesoescala na zona da corrente dos Açores tendo como base o estudo da interação destas estruturas com a topografia, em particular com a MAR. Utilizando altimetria de satélite e grandezas derivadas desta, foi possível estudar algumas questões associadas a esta dinâmica/interação, abrangendo pela primeira vez um período de 19 anos de dados. Os vórtices que interagem com a crista fazem-no de duas formas distintas: cruzando-a ou propagando-se ao longo do seu flanco Este, existindo por vezes uma combinação das duas. Conclui-se neste trabalho que existem quatro formas básicas de passagem sobre a crista: como estrutura coerente, através de divisão do vórtice, da coalescência de vórtices ou através de um processo de *streamer*. Dada a grande dinâmica da região, cujos valores de energia cinética turbulenta (EKE) excedem os $200\text{cm}^2/\text{s}^2$ na zona da crista, ocorre muitas vezes uma conjugação das diferentes formas de passagem. No total, apenas 15% dos vórtices com início de deteção na região associada ao eixo principal da corrente, interagem com a crista. A migração destas estruturas sobre a crista pode ultrapassar os 6 meses, pelo que se pode concluir que os vórtices desta região são profundos o suficiente de modo a serem influenciados pela topografia. Uma descoberta interessante neste trabalho foi a constatação da existência de vórtices que se propagam ao longo do flanco Oeste da crista, ao contrário do esperado tendo em conta o efeito do β -topográfico.

Palavras-chave: Corrente dos Açores, Vórtices, Crista Média Atlântica

Abstract

The Azores Current is the most important circulation structure in the Subtropical North Atlantic. The evolution of the meanders associated with the current causes the formation of vortices, which have a high importance in the flows of momentum and heat in the ocean, as well as in the transportation of nutrients over great distances. As these structures propagate in the ocean beyond interaction with other vortices, they may also interact with the topography, significantly altering its path or even causing its total erosion. The Atlantic Mean Ridge (MAR) has a very pronounced bathymetry with depths close to those of the Azores current. However, the influence of the topography on the average current and turbulent structures in the Azores current zone is practically unknown. In this study a characterization of the mesoscale structures in the zone of the Azores current is made based on the study of the interaction of these structures with the topography, in particular with MAR. Using satellite altimetry and physical values derived from it, it was possible to study some issues associated with this dynamics / interaction, covering for the first time a period of 19 years of data. The vortices interacting with the MAR do it in two distinct ways: crossing it or propagating along its Eastern flank, and sometimes combining these two. It is concluded in this work that there are four basic forms of passage over the crest: as a coherent structure, through vortex division, vortex coalescence or through a streamer process. Given the great dynamics of the region, whose turbulent kinetic energy (EKE) values exceed $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ in the ridge zone, a combination of the different forms of passage often occurs. In total, only 15% of the vortices whose detection starts in the region associated to the main axis of the current, interact with the crest. The migration of these structures on the crest can exceed 6 months, so it can be concluded that the vortices of this region are deep enough to be influenced by the topography. An interesting finding in this work was the existence of vortices that propagate along the Western flank of the ridge, contrary to what is expected, taking into account the β -topographic effect.

Keywords: Azores Current, Eddies, Mid-Atlantic Ridge

ÍNDICE

Agradecimentos	ii
Resumo	v
Abstract.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo e Organização da Tese	1
1.2 Corrente dos Açores	1
1.3 β -Topográfico e a Crista Média Atlântica	4
1.4 Altimetria de Satélite	5
2 DADOS E METODOLOGIA	7
2.1 SLA.....	7
2.2 Trajetórias de Vórtices.....	8
2.2.1 Esquema de procura de trajetórias	9
2.2.2 Estatística.....	10
2.3 Bóias de Superfície e Flutuadores ARGO	11
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1 Análise Global	13
3.2 Região associada ao eixo principal da AzC	19
3.2.1 Passagem sobre a crista	23
3.2.2 Migração ao longo da crista.....	25
3.3 Casos de Estudo.....	27
3.3.1 #4206	28
3.3.2 #5617	32
3.3.3 #53	36
3.3.4 #3170 e #3263	40
4 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	47
ANEXOS	49

LISTA DE ABREVIATURAS

At:	Atlantis
AtFZ:	<i>Atlantis Fracture Zone</i>
Az:	Arquipélago dos Açores
AzC:	Corrente dos Açores, <i>Azores Current</i>
C:	Arquipélago das Canárias
EKE:	Energia Cinética Turbulenta, <i>Eddie Kinetic Energy</i>
GM:	Great Meteor
GS:	Corrente do Golfo, <i>Gulf Stream</i>
H:	Hyères
HyFZ:	Hayes Fracture Zone
I:	Irving
M:	Arquipélago da Madeira
MAR:	Crista Média Atlântica, <i>Mid-Atlantic Ridge</i>
MSS:	Superfície média do mar, <i>Mean Sea Surface</i>
NAC:	Corrente do Atlântico Norte, <i>North Atlantic Current</i>
OFZ:	<i>Oceanographic Fracture Zone</i>
P:	<i>Plato</i>
SLA:	Anomalia da Superfície do Mar, <i>Sea-Level Anomaly</i>
SSH:	Altura da Superfície do Mar, <i>Sea-Level Height</i>
RV:	Vorticidade Relativa, <i>Relative Vorticity</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da ramificação da Corrente do Golfo (GS) para o Inverno, Dezembro a Maio (esquerda) e Verão, Junho a Novembro (direita). A região a sombreado representa a MAR. NAC- Corrente do Atlântico Norte, AzC- Corrente dos Açores e GS- Corrente do Golfo. Adaptado de KLEIN E SIEDLER, 1989 (Figura 10).	2
Figura 2 - EKE média associada à SLA (Anomalia da Superfície do Mar - Sea Level Anomaly). Retirado de AGUIAR et al, 2011 (Figura 5).	2
Figura 3 - Distribuição geográfica de anticiclones (vermelho) e ciclones (azul) detetados nas trajetórias das boias de superfície (esquerda) e estruturas detetadas nos mapas de SLA (utilizando o método de Okubo-Weiss) para um mínimo de tempo de deteção de 4 meses e uma anomalia absoluta da superfície do mar superior a 10cm (direita). Retirado de AGUIAR et al, 2011 (figura 7).	4
Figura 4 - Mapa batimétrico da região estudada. MAR-Crista média Atlântica, Az-Arquipélago dos Açores, M-Arquipélago da Madeira, C-Arquipélago das Canárias, OFZ-Oceanographic Fracture Zone, AtfZ-Atlantis Fracture Zone, HyfZ-Hayes Fracture Zone, GM-Great Meteor, H-Hyères, I-Irving, P-Plato, At-Atlantis.	5
Figura 5 - Ilustração das diferentes grandezas envolvidas na estimativa da SSH- Altura da Superfície do Mar. MSS- Superfície Média do Mar e SLA- Anomalia da Superfície do Mar.	6
Figura 6 - Esquema do pré-processamento realizado aos dados de SLA.	7
Figura 7 - Esquema da procura de trajetórias realizada.	9
Figura 8 - Esquemas de caixas utilizadas na procura de trajetórias de vórtices que: migram ao longo da crista (A), passam sobre a crista (B e C) e pertencem à região associada ao eixo principal da AzC (C).	10
Figura 9 - Formas de passagem dos vórtices sobre a crista.	11
Figura 10 - Ciclones detetados na região de estudo cujo tempo de trajetória é superior respetivamente a (de cima para baixo): 8 semanas, 26 semanas e 52 semanas. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m.	14
Figura 11 - Anticiclones detetados na região de estudo cujo tempo de trajetória é superior respetivamente a (de cima para baixo): 8 semanas, 26 semanas e 52 semanas. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m.	15
Figura 12- Mapa da EKE média para o período compreendido entre 02/01/1993 e 02/01/2012. O traço a preto representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. Os contornos a roxo representam valores de EKE de 100 e 200cm ² /s ² . As batimétricas encontram-se representadas a cada 1000m, desde a superfície até aos 3000m.	16
Figura 13 - Número de ciclones (direita) e anticiclones (esquerda) com início de deteção em cada caixa, que atingem na sua trajetória valores de amplitude respetivamente, de cima para baixo, superiores a 5, 10 e 15cm. As caixas têm uma dimensão de 1° × 1°. As batimétricas encontram-se representadas a cada 1000m, desde a superfície até aos 3000m.	18
Figura 14 - Numero de vórtices com início (esquerda) e fim (direita) de deteção em cada ano, cuja amplitude máxima atingida na sua trajetória é superior ou igual a 10cm.	19

Figura 15 - Trajetórias de ciclones e anticiclones (A e B, respetivamente) detetados na região da corrente dos Açores. Inícios (azul e vermelho) e fins (preto) de deteção destes vórtices (a e b). Existem vórtices com fim de deteção para além dos limites do mapa. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m. O traço preto representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a tracejado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.	20
Figura 16- Número de ciclones (esquerda) e anticiclones (direita) com início de deteção em cada caixa, que atingem na sua trajetória valores de amplitude respetivamente, superiores a 5 (A e D), 10 (B e E) e 15cm (C e F). As caixas têm uma dimensão de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. As batimétricas encontram-se representadas a cada 1000m, desde a superfície até aos 3000m. O pontilhado representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a tracejado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.	21
Figura 17 - Numero de vórtices detetados com início (esquerda) e fim (direita) de deteção em cada ano, na região associada à corrente dos Açores, cuja amplitude máxima atingida na sua trajetória é superior ou igual a 10cm.	22
Figura 18 - Distribuição geográfica dos vórtices associados ao eixo principal da AzC, cuja amplitude máxima atingida na sua trajetória é superior ou igual a 10cm. A) Ciclones e B) Anticiclones. As setas representam a velocidade média de translação associada a cada uma destas estruturas e os círculos os seus raios médios correspondentes. O valor de 100km corresponde ao raio do círculo. As batimétricas encontram-se representadas em intervalos de 500m. A localização de cada vórtice refere-se à sua origem de deteção.	23
Figura 19 - Trajetórias dos vórtices detetados na região da AzC (A-ciclones e B- anticiclones) que cruzam a crista com respetivos inícios e fins de deteção. Trajetórias de vórtices (a-ciclones e b-anticiclones) que apenas passam sobre a crista sem migrar ao longo desta. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m. O tracejado verde representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a pontilhado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.	24
Figura 20 - A) Latitude de Passagem dos vórtices que cruzam a MAR e respetiva forma de passagem: MRG- Coalescência, SPL- Separação, STR- Streamer e CHR- Estrutura Coerente. Os contornos das barras a azul refere-se a ciclones e a vermelho aos anticiclones. B) - Tempo de interação dos vórtices que cruzam a crista com esta.	25
Figura 21 - Trajetórias dos vórtices detetados na região da AzC (A-ciclones e B- anticiclones) que migram ao longo da crista com respetivos inícios e fins de deteção. Trajetórias de vórtices (a-ciclones e b-anticiclones) que apenas migram sobre a crista sem a cruzar. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m. O tracejado verde representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a pontilhado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.	26
Figura 22 – Tempo de interação dos vórtices que migram ao longo da crista, com esta.	27
Figura 23 - Mapa das trajetórias completas do ciclone (azul) e o ARGO (verde). O tracejado preto, sobreposto às trajetórias, indicam o intervalo de interação entre o vórtice e o ARGO. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas.	28
Figura 24 - A) Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice. Os pontos pretos representam os tempos de interação com a crista. B) Velocidade de rotação do vórtice ao longo do seu trajeto (azul) e velocidade de rotação do ARGO (verde). As linhas horizontais cinzentas representam as respetivas médias das velocidades (os valores destas encontram-se sobre a linha). Em A) e B), a linha a	

tracejado vertical representa a data de interseção da trajetória do vórtice com o eixo central da crista.	29
Figura 25 - Mapas de SLA para os dias 05/05/2010-A; 25/11/2010-B; 16/01/2011, C; 15/02/2011-D e 11/05/2011-E. A linha a azul representa a trajetória do anticiclone e a circunferência preta o raio do vórtice. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.	30
Figura 26 – Mapas de vorticidade relativa para os dias 05/05/2010-A; 25/11/2010-B e 15/02/2011-C. A linha a azul representa a trajetória do ciclone e a circunferência azul o raio do vórtice.	31
Figura 27 - Mapa das trajetórias completas do anticiclone (vermelho) e da boia de superfície (verde). O tracejado preto, sobreposto às trajetórias, indicam o intervalo de interação entre o vórtice e a boia. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas.	32
Figura 28 - A) Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice. Os pontos pretos representam os tempos de interação com a crista. B) Velocidade de rotação do vórtice ao longo do seu trajeto (azul) e velocidade de rotação da boia de superfície (verde). As linhas horizontais cinzentas representam as respectivas médias das velocidades (os valores destas encontram-se sobre a linha). Em A) e B), a linha a tracejado vertical representa a data de interseção da trajetória do vórtice com o eixo central da crista.	33
Figura 29 - Mapas de SLA para os dias 02/12/96-A; 13/04/97-B; 06/06/97- C; 02/07/97-D e 14/10/97-E. A linha vermelha representa a trajetória do anticiclone e a circunferência preta o raio do vórtice. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.	34
Figura 30 - Mapas de vorticidade relativa para os dias 13/04/1997-A; 02/07/1997-B e 14/10/1997-C. A linha a azul representa a trajetória do anticiclone e a circunferência vermelha o raio do vórtice.	35
Figura 31 - Mapa das trajetórias completas do anticiclone (vermelho) e da boia de superfície (verde). O tracejado preto, sobreposto às trajetórias, indicam o intervalo de interação entre o vórtice e a boia. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas.	36
Figura 32 - A) Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice. Os pontos pretos representam os tempos de interação com a crista. B) Velocidade de rotação do vórtice ao longo do seu trajeto (azul) e velocidade de rotação da boia de superfície (verde). As linhas horizontais cinzentas representam as respectivas médias das velocidades (os valores destas encontram-se sobre a linha). Em A) e B), a linha a tracejado vertical representa a data de interseção da trajetória do vórtice com o eixo central da crista.	37
Figura 33 - Mapas de SLA para os dias 12/09/1993-A; 01/03/1994-B; 13/07/1994-C; 31/10/1994-D; 01/03/1995-E. A linha a azul representa a trajetória do ciclone e as circunferências pretas os raios dos vórtices. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.	38
Figura 34 - Mapas de vorticidade relativa para os dias 01/03/1994-A; 31/10/1994-B e 01/03/1995-C. A linha a azul representa a trajetória do anticiclone e a circunferência azul o raio do vórtice.	39
Figura 35 - Mapa das trajetórias dos dois ciclones. As circunferências pretas representam os raios dos vórtices e os asteriscos os seus centros. A sequência de raios pretende representar a coalescência dos dois vórtices. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas. O valor de 100km corresponde ao raio do círculo.	40
Figura 36 - Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice para os vórtices #3170 (A) e #3263 (B).	41

Figura 37- Mapas de SLA para os dias 05/01/2006-A; 29/05/2006-B; 22/07/2006-C; 13/08/2006-D; 10/11/2006-E; 22/11/2006-F e 22/01/2007-G. A linha a azul representa a trajetória do ciclone #3170 e a linha azul a tracejado a do ciclone #3263. As circunferências pretas os raios dos mesmos. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.....	42
Figura 38 - Mapas de vorticidade relativa para os dias 29/05/2006-A; 13/08/2006-B; 22/11/2006-C e 22/01/2007-D. A linha a azul representa a trajetória do ciclone #3170 e a linha azul a tracejado a do ciclone #3263. As circunferências pretas os raios dos mesmos.	43
Figura 39 - Trajetórias de anticiclones na região da falha Atlantis.	49
Figura 40 - A) Tempo de trajetória, B) raio máximo e C) amplitude máxima obtidos em cada uma das trajetórias dos vórtices detetados na região de estudo.	49
Figura 41 - Tempo de trajetória (esquerda). Raio máximo (centro) e amplitude máxima (direita) obtidos em cada uma das trajetórias dos vórtices detetados na região da AzC (A), dos vórtices que cruzam a MAR (B) e dos vórtices que migram ao longo desta (C).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características gerais dos vórtices associados à AzC*.	4
Tabela 2 - Número de vórtices detetados na região de estudo. Não existem vórtices com início de detecção posterior a 31/12/2011, nem com fim de detecção anterior a 01/01/1993.	13
Tabela 3 - Percentagem de vórtices na região de estudo em função do seu tempo de trajetória.....	17
Tabela 4 - Número de vórtices detetados por ano com amplitudes superiores a 5, 10 e 15 cm para a região estudada.....	19
Tabela 5 - Número de detecções de vórtices por ano com amplitudes superiores a 5, 10 e 15 cm para a região associada ao eixo principal da corrente.	22
Tabela 6 - Número de vórtices que interagem com a crista	45
Tabela 7 - Características dos vórtices que se encontram fora dos limites dos intervalos dos histogramas da figura 40.....	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo e Organização da Tese

Esta tese teve como objetivo principal estudar a dinâmica de estruturas de mesoescala, vórtices, associadas à Corrente dos Açores, aquando da sua interação com a topografia mais proeminente na região, a Crista Média Atlântica (MAR- Mid-Atlantic Ridge), utilizando altimetria de satélite e grandezas derivadas desta. Para tal, foi desenvolvida uma metodologia que permitisse responder a algumas questões relevantes sobre esta dinâmica/interação:

- De que modo é feita a propagação destas estruturas aquando da sua interação com a MAR?
- Haverá passagem destes vórtices sobre a crista? Se sim, existirão locais preferenciais?
- Que percentagem de vórtices interage realmente com a MAR?
- Será possível tipificar as formas de interação dos vórtices com a topografia?
- Existirá, nesta interação, diferenças no que respeita a polaridade destes vórtices?

Deste modo, este trabalho não pretende ser de forma alguma um estudo exaustivo sobre os processos físicos englobados na interação destas estruturas, quer com a topografia, quer entre si, mas, por um lado, ser um primeiro passo para o conhecimento mais aprofundado da população de vórtices existente na região, compreendendo 19 anos de dados e por outro, ser uma primeira abordagem qualitativa à dinâmica destas estruturas no que diz respeito à sua propagação e interação com a topografia.

A tese está organizada em 4 capítulos. No 1º capítulo é feita uma pequena caracterização da região estudada, sendo apresentados os trabalhos mais importantes existentes sobre a sua dinâmica. De seguida é resumida a importância da altimetria de satélite para o estudo destas estruturas e por último é introduzido o conceito de β -topográfico e a sua relevância na MAR. No 2º capítulo são apresentados os dados e a metodologia utilizada. No 3º capítulo é realizada uma discussão dos resultados obtidos, sendo descritos com mais detalhe 4 casos de estudo. No último capítulo são feitas algumas conclusões gerais sobre o trabalho.

1.2 Corrente dos Açores

A Corrente dos Açores (AzC - Azores Current¹) é a estrutura de circulação oceânica mais importante no Atlântico Norte Subtropical, a Este da MAR, sendo parte integrante do Giro Subtropical do Atlântico Norte [GOULD, 1985]. Esta tem como origem a separação da Corrente do Golfo (GS - Gulf Stream), a Oeste da Crista, em dois ramos: um com direção para Norte - a Corrente do Atlântico Norte (NAC - North Atlantic Current) - e um outro com direção para Sudeste, seguindo posteriormente para Este após passagem sobre a crista - a Corrente dos Açores [SY, 1988; KLEIN E SIEDLER, 1989], apresentando forte variabilidade sazonal (figura 1). A AzC é uma corrente de jato, sendo o seu escoamento aproximadamente zonal entre os 33° e 35°N a Este da crista, centrado aos 34°N, com direção ao Golfo de Cádiz. Na visão clássica a corrente apresenta três ramos com direção a Sul, a Este da MAR (figura 1), alimentando, o ramo junto ao continente Africano, a Corrente das Canárias [KÄSE E SIEDLER, 1982; GOULD, 1985]. À AzC está associada uma frente termohalina bem definida, a Frente dos Açores

¹ Foram utilizadas abreviaturas em inglês apenas por uma questão de conveniência.

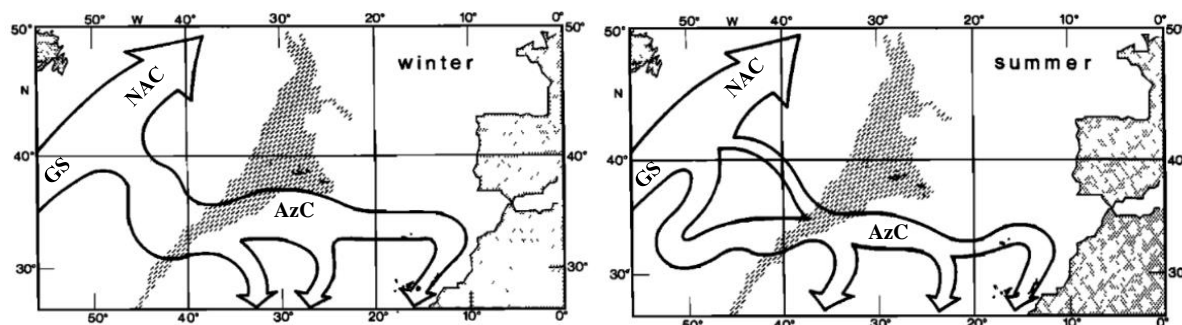


Figura 1 - Esquema da ramificação da Corrente do Golfo (GS) para o Inverno, Dezembro a Maio (esquerda) e Verão, Junho a Novembro (direita). A região a sombreado representa a MAR. NAC- Corrente do Atlântico Norte, AzC- Corrente dos Açores e GS- Corrente do Golfo. Adaptado de **KLEIN E SIEDLER, 1989** (Figura 10).

(AzCF - Azores Front), estando a corrente e a frente, com aproximação à primeira ordem, em equilíbrio geostrófico [**ALVES *et al*, 2002**]. Alguns estudos sugerem que a AzC tem uma estrutura vertical contida em média nos primeiros 1000m, apresentando uma natureza de origem baroclínica [**KLEIN E SIEDLER, 1989; ALVES E VERDIÈRE, 1999**]. Os valores de transporte desta corrente apresentados na literatura são diversos, embora o valor de aproximadamente 10Sv^2 . **AGUIAR *et al*, 2011** refere a existência de 3 regiões, no que respeita a distribuição da energia cinética turbulenta (EKE - Eddy Kinetic Energy) associada à AzC (figura 2) a Este da MAR, apresentando esta os valores mais elevados na região entre a crista e os bancos de montes submarinos (não visíveis na figura) localizados aos $28^\circ\text{--}29^\circ\text{W}$. Estes valores excedem os $200\text{cm}^2/\text{s}^2$, tendo sido este valor obtido por diversos outros estudos como, por exemplo, **RICHARDSON, 1983** e **PINGREE E SINHA, 1998**. É possível observar, na mesma figura, uma ligeira inclinação do eixo da EKE, inclinação esta correspondente à inclinação associada ao eixo da AzC, já reportado por **NIILER *et al*, 2003**. **LÁZARO *et al*, 2013** concluem no seu trabalho que o eixo da corrente tem uma inclinação de cerca de 1° para Norte a Este dos 28°W , causado, de acordo com **VOLKOV E FU, 2011**, pelo trajeto da AzC sobre a MAR e a sua tendência a dirigir-se para o Golfo de Cádiz.

Ao longo dos anos têm sido observadas e estudadas estruturas de mesoescala a Norte e a Sul do eixo da AzC. Num dos primeiros estudos desta corrente, **GOULD, 1985**, refere a observação de um vórtice ciclónico com núcleo frio com um diâmetro de 100-115km e uma velocidade de propagação para Oeste de 2.2km/dia, utilizando dados *in situ* de uma campanha no Verão de 1981. Das estruturas observadas

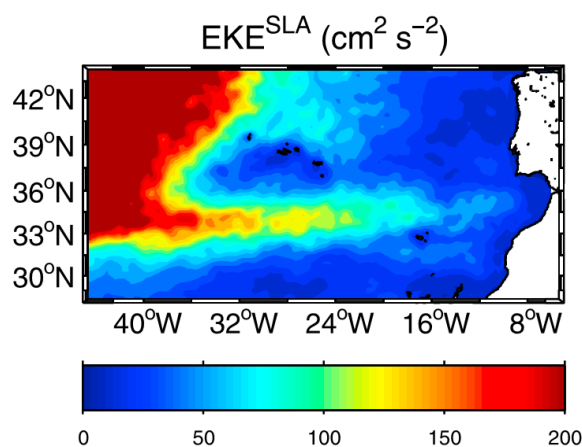


Figura 2 - EKE média associada à SLA (Anomalia da Superfície do Mar - Sea Level Anomaly). Retirado de **AGUIAR *et al*, 2011** (Figura 5)

² $1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3/\text{s}$

nesta região salientam-se os vórtices ciclónicos de grande dimensão reportados por **PINGREE E SINHA, 1998** e **PINGREE E SINHA, 2001**, apelidados de **STORM** (*SubTropical Oceanic Ring of Magnitude*). Estes vórtices apresentam raios de cerca de 200km, com velocidades de propagação entre 2.5 e 3cm/s, sendo detetados aos 33°N, aproximadamente, a sul do eixo principal da AzC, na região Este desta. Alguns destes vórtices foram detetados junto à MAR, enquanto outros aparentam alongar-se e separar-se, podendo ser parcialmente reabsorvidos pela AzC [**PINGREE et al, 1999**]. **SANGRÀ et al, 2009**, apresenta um estudo abrangendo a zona Este da AzC, onde identifica quatro corredores de vórtices: dois pequenos corredores a Norte e a Sul (sendo o corredor a Sul apelidado de Storm Corridor, devido à presença dos vórtices ciclónicos (STORM) referidos anteriormente) do eixo principal da AzC, um localizado a sul do arquipélago da Madeira, cerca dos 31°N, e por último o Corredor de Vórtices das Canárias, composto maioritariamente por anticiclones, estendendo-se entre os 22°N e os 29°N, sendo este último o principal objeto de estudo do trabalho. Os vórtices associados a este corredor têm tempos de vida longos, propagando-se até aos 32°W, aproximadamente, tendo a sua origem associada à perturbação da corrente das Canárias (devido à presença do arquipélago) e à presença dos ventos alísios, atuando estes como um mecanismo forçador. Ao contrário destes vórtices, cujo local de formação é bem definido, a origem dos vórtices associados à AzC continua a ser desconhecida. Neste estudo, utilizando dois métodos distintos, foram detetados na região associada ao eixo principal da AzC (entre os 33°N e os 38°N) cerca de 45 vórtices com tempos de vida superiores a 6 meses para o período compreendido entre 1992 e 2006. Considerando também os vórtices associados ao corredor da Madeira obtém-se um total de 65 vórtices (**SANGRÀ et al, 2009** - tabela 1). Mais recentemente, em **2011**, **AGUIAR et al**, apresenta um estudo mais completo (abrangendo uma maior área) no que respeita a caracterização dos vórtices associados à AzC, combinando dados de boias de superfície e de altimetria de satélite entre 1990 e 2009. Dos resultados obtidos, salienta-se a assimetria meridional na distribuição dos ciclones e anticiclones visível na distribuição geográfica das estruturas detetadas (figura 3) nos dados de boias e de altimetria (mais visível nestes), existindo uma maior concentração de ciclones a Sul do eixo da corrente e anticiclones a Norte desta. De facto, vários estudos referem a tendência para existir uma assimetria na formação de vórtices a Norte e Sul do eixo da corrente. **ALVES E VERDIÈRE, 1999**, conclui, com base na análise da instabilidade baroclínica do jato (analisando modelos numéricos), que esta assimetria se traduz pela formação de anticiclones coerentes a Norte da corrente, enquanto que a geração de ciclones a sul desta se degenera, formando filamentos ciclónicos de curto tempo de vida. Em **2002**, **ALVES et al**, propõe um novo mecanismo para a formação de estruturas ciclónicas a sul do eixo da corrente. Este novo mecanismo diferencia a formação de ciclones nas zonas Este e Oeste da corrente, assim, os ciclones formados na região Este (cerca dos 19°W) seriam mais coerentes e com tempo de vida superior aos formados na região Oeste (cerca de 35°W). Dado sua velocidade de propagação ser de 2.5km/dia, os vórtices originados a Este poder-se-iam encontrar na região Oeste, apesar de não ser essa a sua região de formação, tendo a dimensão destes vórtices valores típicos entre 130 e 200km de raio. No entanto, **AGUIAR et al, 2011**, conclui que os vórtices na zona Oeste são mais intensos, com uma dimensão superior e em maior número, sendo visível tanto nos dados de boias, como nos dados de altimetria. Estes vórtices apresentam raios entre 100 e 120km, enquanto na região centro os seus valores apenas variam entre os 70 e os 80km. As estruturas detetadas neste estudo variam entre as 144 (dados de boias) e 171 (dados de altimetria), constituindo os anticiclones 40% da população. A velocidade média de translação destes vórtices apresenta valores compreendidos entre 2 e 3 cm/s, sendo as velocidades mais elevadas observadas na região Oeste. No que respeita a velocidade de rotação, esta é cerca de 17cm/s, independentemente da polaridade dos vórtices.

Na tabela 1 encontram-se sumarizadas as principais características dos vórtices associados à AzC aqui referidos.

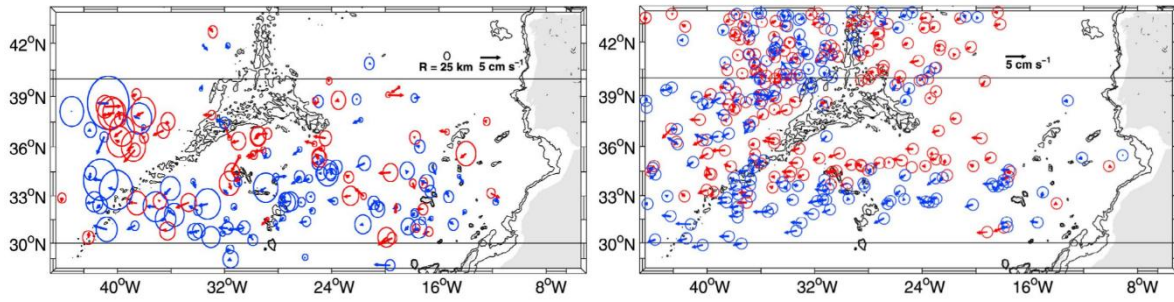


Figura 3 - Distribuição geográfica de anticiclones (vermelho) e ciclones (azul) detetados nas trajetórias das boias de superfície (esquerda) e estruturas detetadas nos mapas de SLA (utilizando o método de Okubo-Weiss) para um mínimo de tempo de detecção de 4 meses e uma anomalia absoluta da superfície do mar superior a 10cm (direita). Retirado de AGUIAR *et al*, 2011 (figura 7).

Tabela 1 - Características gerais dos vórtices associados à AzC*.

	D (km)	V (km/dia)	U _r (km/dia)	P
Gould, 1985	100-115	2.2	7-14	C
Pingree, 1998 e 2001	200	2.5	-	C
Alves, 2002	130-200	2.5	-	C/AC
Barbosa, 2011	80-120	2-3	17	C/AC

*C- Ciclones e AC- Anticiclones. D- Diâmetro, V- Velocidade de Translação, P- Polaridade, U_r- Velocidade de Rotação

1.3 β -Topográfico e a Crista Média Atlântica

A propagação de vórtices no oceano deve-se à combinação do efeito- β (variação latitudinal do parâmetro de Coriolis) e do escoamento médio ambiente. À medida que o vórtice se propaga, para além da interação com outros vórtices, pode interagir com a topografia, como por exemplo, montes submarinos isolados ou cadeias montanhosas submarinas. Estas interações têm uma influência importante na trajetória dos vórtices, podendo originar a separação destes e, em casos extremos, causar a sua destruição total [VAN GEFFEN E DAVIES, 2000]. As interações entre vórtices podem também ser horizontais, de onde se salienta o acoplamento dipolar, onde existe uma associação entre um ciclone e um anticiclone, propagando-se estes juntos, e a coalescência de vórtices, processo pelo qual dois vórtices com a mesma polaridade se juntam formando uma estrutura de maior dimensão [CARTON, X., 2000].

O efeito do β -topográfico consiste na influência da trajetória dos vórtices, induzindo nestes uma propagação na direção que deixa as batimétricas mais elevadas à sua direita, estando relacionado com o estiramento e contração das estruturas devido à presença da topografia. O efeito desta grandeza pode ser analisado do ponto de vista da conservação da vorticidade potencial³, sendo assim possível estabelecer uma analogia entre a influência do β -planetário e o β -topográfico. A Crista Média Atlântica (figura 4)

³ A conservação da vorticidade potencial (PV) tem a contribuição de 3 fatores: a vorticidade planetária ($f = f_0 + \beta y$), a vorticidade relativa (ζ) e o estiramento do vórtice (H). [HOLTON, 1993]

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{d\left(\frac{f+\zeta}{H}\right)}{dt} = 0$$

apresenta uma topografia⁴ bastante pronunciada, pelo que se torna importante incluir este efeito na análise das trajetórias dos vórtices presentes na região.

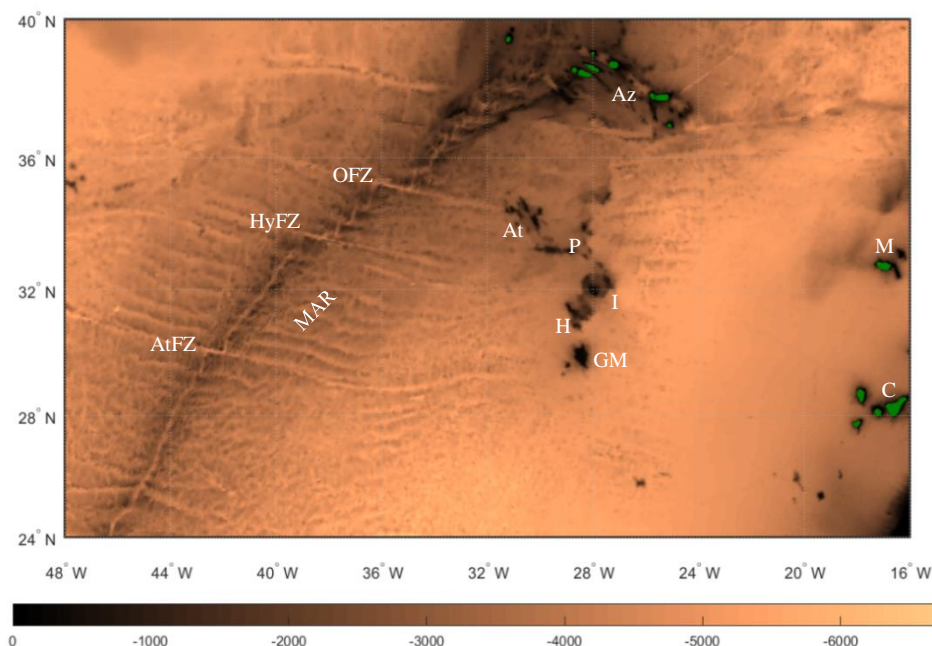


Figura 4 - Mapa batimétrico da região estudada. MAR-Crista média Atlântica, Az-Arquipélago dos Açores, M-Arquipélago da Madeira, C-Arquipélago das Canárias, OFZ-Oceanographic Fracture Zone, AtFZ-Atlantis Fracture Zone, HyFZ-Hayes Fracture Zone, GM-Great Meteor, H-Hyères, I-Irving, P-Plato, At-Atlantis.

1.4 Altimetria de Satélite

Nas últimas décadas, a altimetria de satélite tem demonstrado ser uma ferramenta valiosa para o estudo da oceanografia de mesoescala, fornecendo uma monitorização regular, de alta resolução e global do nível do mar, bem como a variação na circulação oceânica [MORROW E LE TRAON, 2011]. Na realidade anteriormente ao lançamento, em 1992, do satélite altimétrico ERS-1/2, a resolução dos dados altimétricos existentes, obtidos através do satélite Topex/Poseidon (T/P), era demasiado grosseira para poder explicar a variabilidade de mesoescala (vórtices) visível nos dados de altimetria resultantes da interpolação de diferentes missões. De facto, muitos trabalhos anteriores baseados apenas nos dados do T/P interpretam esta variabilidade como ondas de Rossby. Assim, a maior descoberta resultante da evolução da altimetria de satélite é o facto da variabilidade de mesoescala consistir essencialmente na propagação para Oeste de vórtices não lineares. Esta diferenciação entre ondas de Rossby e vórtices não lineares é de extrema importância dado que os últimos têm a capacidade para transportar parcelas de água, bem como as suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Assim, os vórtices têm uma influência importante nos fluxos de calor e momento, bem como na dinâmica dos ecossistemas marinhos [CHELTON *et al*, 2011].

⁴ Os dados de batimetria utilizados nesta tese correspondem à versão ETOPO2 disponível online em <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>, cuja resolução é de 2', correspondendo a 0.0333° aproximadamente.

A figura 5 ilustra de uma forma simplista as medições necessárias para a obtenção da altura da superfície do mar, SSH, bem como algumas grandezas derivadas desta. Os radares altimétricos transmitem permanentemente pulsos (aproximadamente 1700 pulsos/s) para a Terra, recebendo o eco da superfície. Após a trajetória da órbita do satélite ter sido devidamente localizada (latitude, longitude e altitude) em relação ao elipsoide de referência, a SSH é obtida como a diferença entre a altitude da órbita e o alcance do radar altimétrico⁵. A anomalia da superfície do mar é simplesmente calculada como a diferença entre a SSH e a superfície média do mar, MSS.

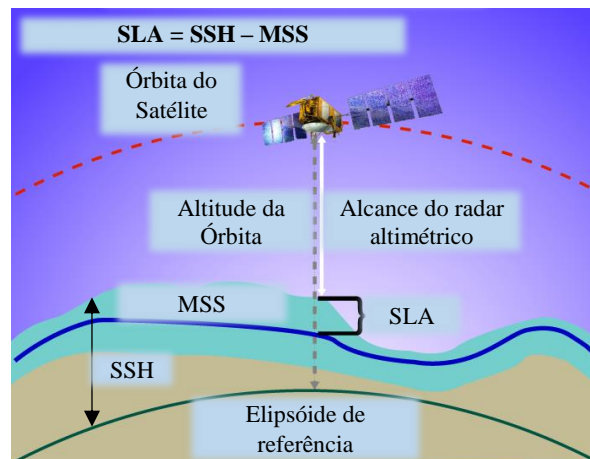


Figura 5 - Ilustração das diferentes grandezas envolvidas na estimativa da SSH- Altura da Superfície do Mar. MSS- Superfície Média do Mar e SLA- Anomalia da Superfície do Mar.

Adaptado de https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lssa/SeaLevelRise/LSA_SLR_background.php

⁵ Referência: <http://www.altimetry.info/radar-altimetry-tutorial/how-altimetry-works/basic-principle/>

2 DADOS E METODOLOGIA

2.1 SLA

Os dados de SLA utilizados neste trabalho encontram-se, presentemente, disponíveis online em <http://marine.copernicus.eu/> (anteriormente em <https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>), abrangendo estes o período entre 02/01/1993 e 27/12/2014, sendo o erro associado a esta grandeza, na região de estudo, inferior a 20% [AGUIAR *et al*, 2011]. O pré-processamento destes dados foi realizado seguindo o método descrito em AGUIAR *et al*, 2011, encontrando-se esquematizado na figura 6. Para remover o efeito estérico da expansão (compressão) do oceano à superfície, relacionada com o aquecimento (arrefecimento) deste, em períodos prolongados (variabilidade de larga escala) [AGUIAR *et al*, 2011], foi realizada a média temporal do campo de SLA.

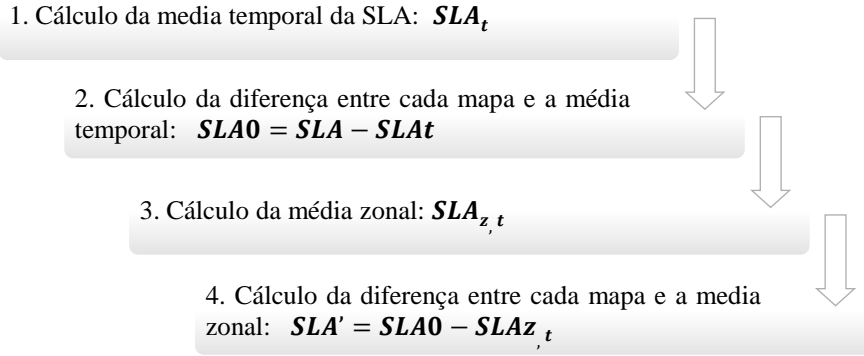


Figura 6 - Esquema do pré-processamento realizado aos dados de SLA.

O campo de velocidades associado ao campo da SLA' foi derivado a partir deste, utilizando as equações (1) e (2), as quais traduzem o balanço geostrófico [CHENG *et al*, 2014] para a componente da anomalia da velocidade geostrófica de superfície:

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{g}{f R_t} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \quad (1)$$

$$v' = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{g}{f R_t \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} \quad (2)$$

Onde u' e v' são as componentes zonal e meridional da anomalia da velocidade geostrófica, g é a aceleração da gravidade, f é o parâmetro de Coriolis ($f = 2\Omega \sin \phi$, $\Omega = 7.29 \times 10^{-5} s^{-1}$ é a velocidade angular da Terra), $R_t = 6371 km$ é o raio médio da Terra, ϕ e λ são a latitude e longitude, respetivamente, e η é a SLA. Os valores de $\partial \phi$ e $\partial \lambda$ em radianos. A partir destes campos foi possível determinar a vorticidade relativa⁶, ζ (equação (3)) e a EKE por unidade de massa (equação (4)) [CHENG *et al*, 2014]. A EKE média foi calculada para o intervalo de tempo entre 02/01/1993 e 02/01/2012.

⁶ A vorticidade relativa quantifica a rotação de um fluido, sendo definida pelo rotacional da velocidade, $\nabla \times \vec{V}$. [HOLTON, 1993]

$$\zeta = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} \quad (3)$$

$$EKE = \frac{(u'^2 + v'^2)}{2} \quad (4)$$

2.2 Trajetórias de Vórtices⁷

A detecção e individualização dos vórtices presentes na região, foi realizada utilizando a detecção e respetivas trajetórias calculadas por Dudley B. Chelton e Michael G. Schlax disponíveis online em <http://wombat.coas.oregonstate.edu/eddies/index.html>, correspondendo os dados utilizados nesta tese à 3ª versão, compreendendo o período entre 14/10/1992 e 04/04/2012. Estas foram calculadas utilizando dados de SSH, correspondentes à Série de Referência (renomeada em 2014 de *Two-Sat-Merged*) disponível em <https://www.aviso.altimetry.fr/en/my-aviso.html>.

Método de detecção dos vórtices:

CHELTON *et al*, 2011 apresenta uma nova metodologia para a detecção de vórtices tendo por base o contorno de SSH, sem recorrer ao cálculo de parâmetros de ordem mais elevada como o de Okubo-Weiss, W , o qual mede a importância relativa entre a rotação e a deformação no escoamento de um fluido. A utilização de W implementada por **ISERN-FONTANET *et al*, 2003** na detecção automática de vórtices, apresenta algumas limitações. Em primeiro lugar é necessário definir um valor base de W a partir do qual os vórtices são definidos, não existindo um valor ideal para todo o globo; o seu valor é obtido a partir do cálculo do produto de segundas derivadas dos campos de SSH, sendo assim este parâmetro influenciado pelo ruído associado a este campo e por último, o interior dos vórtices definidos a partir deste método não coincide, em geral, com os contornos de SSH. O novo método de detecção define um vórtice com base nos seguintes critérios:

- 1) Os valores de SSH de todos os pixéis que definem o vórtice encontram-se acima ou abaixo de um certo valor pré-definido para anticiclones e ciclones respetivamente;
- 2) O vórtice é constituído no mínimo por 8 pixéis (cuja resolução é de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) e no máximo por 1000;
- 3) Existe pelo menos um máximo (ou mínimo) local de SSH;
- 4) A amplitude do vórtice tem um valor mínimo de 1cm;
- 5) A distância entre um par de pontos situados no interior da região que define o vórtice deve ser inferior a um certo valor pré-definido.

Para facilitar a detecção dos vórtices, os campos de SSH foram filtrados espacialmente nas duas dimensões de modo a remover a variabilidade de larga escala. Estes foram posteriormente detetados nos mapas de SSH de 7 em 7 dias, utilizando um algoritmo de detecção automática (descrito no apêndice B.4 **CHELTON *et al*, 2011**).

Este novo método de detecção de vórtices apresenta, no entanto, algumas limitações, sendo as mais importantes o facto de um vórtice poder conter mais do que um mínimo ou máximo local de SSH e o

⁷ Este subcapítulo pretende descrever, na sua maioria e de um modo muito resumido, a metodologia descrita em **CHELTON *et al*, 2011**.

facto da automatização originar muitas vezes a perda de deteção, prematura, dos vórtices [apêndice B **CHELTON et al, 2011**].

Grandezas derivadas:

Utilizando este novo método de deteção, para além das trajetórias de vórtices (latitude e longitude para cada ponto da trajetória), os autores disponibilizam também informação de diferentes grandezas derivadas dos campos de SSH e velocidades geostróficas: amplitude (A , cm), raio (L , km) e a velocidade de rotação (U , cm/s) de cada uma das estruturas detetadas, em cada ponto da sua trajetória. A amplitude de cada vórtice, A , é definida como *a magnitude da diferença entre a altura de referência, h_0 (estimada como o valor médio da SSH calculado sobre o perímetro dos pixéis que definem o vórtice) e o valor extremo da SSH no interior do vórtice, $h_{máx}$* . Devido ao modo como é calculada, esta grandeza apresenta valores positivos para ambas as polaridades dos vórtices (equação (5)). Na região da corrente dos Açores esta atinge um valor médio aproximado de cerca de 10cm [Figura 10, **CHELTON et al, 2011**]. De um modo geral esta grandeza apresenta um viés de cerca de -1 a -2cm nas regiões de grande variabilidade energética [apêndice C, **CHELTON et al, 2011**]. **CHELTON et al, 2011**, definem o raio do vórtice recorrendo à escala espacial L_s definida como *o raio de um círculo com área igual àquela contida no interior da fronteira de SSH associada ao máximo de velocidade geostrófica média*. Esta escala corresponde aproximadamente ao raio associado a uma vorticidade relativa igual a zero no interior do vórtice. Na região da corrente dos Açores esta atinge um valor médio aproximado de cerca de 100km [Figura 12, **CHELTON et al, 2011**]. A velocidade de rotação, U , é definida como *a velocidade geostrófica média em torno da fronteira de SSH que define a escala L_s* . Esta é proporcional à razão entre a amplitude e o raio de cada vórtice.

$$\begin{cases} A_{anticiclone} = h_{máx} - h_0 \\ A_{ciclone} = h_0 - h_{máx} \end{cases} \quad (5)$$

A velocidade de propagação zonal e meridional foi estimada a partir de uma regressão linear da longitude e latitude em função do tempo, respetivamente, em segmentos de 8 pontos (equivalente a 8 semanas) sem sobreposição, para a trajetória de cada vórtice, de acordo com **CHELTON et al, 2011**.

2.2.1 Esquema de procura de trajetórias

Utilizando as trajetórias de vórtices descritas, procedeu-se a um esquema de procura destas por caixas. Esta pesquisa foi realizada com dois objetivos principais: encontrar os vórtices que cruzam a MAR e os vórtices que migram ao longo desta - figura 7. Cada uma destas pesquisas envolveu posteriormente duas análises visuais: a primeira com base em imagens (da trajetória de cada vórtice) e a segunda com base em imagens sequenciais (vídeos) dos mapas do campo da SLA. Na primeira análise visual foram selecionadas aquelas que apresentavam trajetórias que cruzavam de facto a crista ou que migravam ao

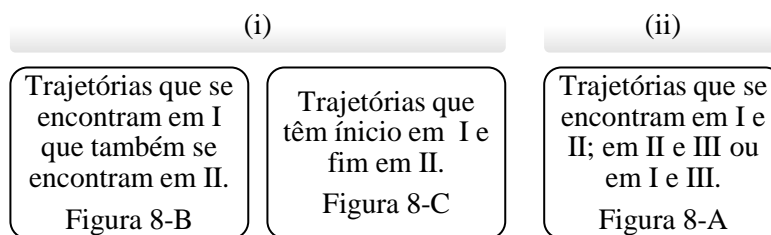


Figura 7 - Esquema da procura de trajetórias realizada.

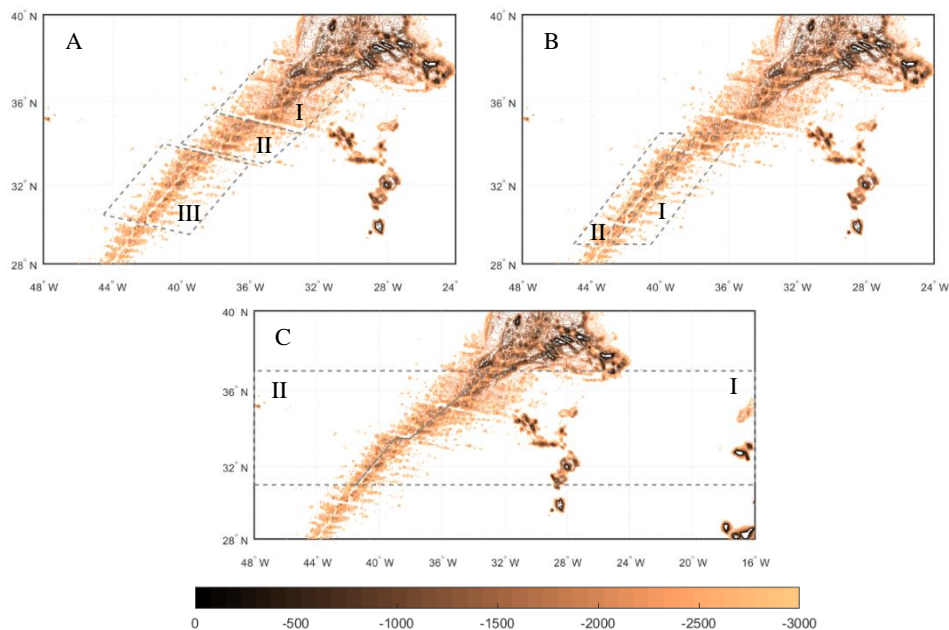


Figura 8 - Esquemas de caixas utilizadas na procura de trajetórias de vórtices que: migram ao longo da crista (A), passam sobre a crista (B e C) e pertencem à região associada ao eixo principal da AzC (C).

longo desta. Na segunda análise visual foram excluídas as deteções em que se considerou que não refletiam a trajetória de um vórtice ou aquelas em que a deteção de um ponto para outro não era referente à mesma estrutura. Foram experimentados vários esquemas, no que respeita às caixas selecionadas, mas qualquer um deles exclui sempre algumas trajetórias.

2.2.2 Estatística

A caracterização dos vórtices detetados, quer a nível de dimensão (raio) e amplitude foi realizada do ponto de vista estatístico, tendo sido utilizados os valores mais elevados destas grandezas atingidos em cada uma das trajetórias. Estes valores podem, por vezes, não ser indicativos destas grandezas no total do percurso considerado. Foi também realizada a estatística do tempo de vida de cada vórtice, utilizando o total do tempo de deteção que, por vezes, pode ser subestimado nos casos de perda de deteção. Os histogramas resultantes desta análise encontram-se em anexo, sendo referenciados ao longo do capítulo 3.

De modo a determinar a latitude e forma de passagem (figura 9) dos vórtices sobre a crista foram analisados, de forma exaustiva, mapas sequenciais de SLA (vídeos), onde a forma de passagem foi definida no momento de intersecção da trajetória com o eixo central aproximado da MAR. Devido ao facto dos vórtices na região entre os 30°N e os 38°N sofrerem vários processos de interação (entre si e com a topografia) esta definição foi bastante complexa, tendo sido, por vezes, extremamente difícil distinguir alguns processos, nomeadamente a separação de vórtices e o processo de *streamer*⁸. No caso das estruturas anticiclónicas, dado o facto de estas apresentarem, na sua maioria, uma estrutura menos coerente⁹, foi muitas vezes também difícil de distinguir a forma de passagem como estrutura isolada ou como coalescência, principalmente nos casos em que os valores de SLA eram pequenos. Assumiu-se

⁸ Este processo, no contexto deste trabalho pretende identificar a formação de pequenos jatos que transferem energia entre vórtices.

⁹ Entende-se por uma estrutura mais coerente, neste contexto, uma estrutura cujos contornos de SLA são mais aproximados de uma forma circular, tendo assim o vórtice uma estrutura mais definida.

assim, a forma de passagem como a dominante. No que respeita ao tempo de interação dos vórtices com a crista, este foi determinado por análise visual, tendo sido definido como tempo de início e fim de interação com a crista a interceção da trajetória do vórtice com a batimétrica dos 3000m pertencente, respetivamente, aos flancos Este e Oeste da MAR.

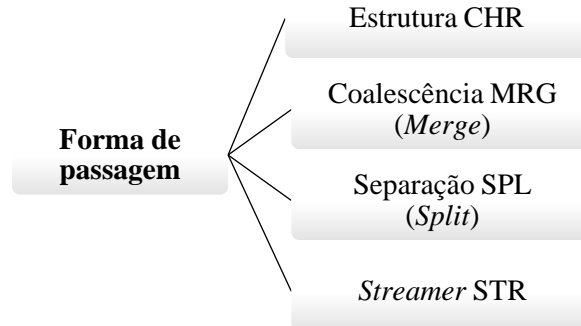


Figura 9 - Formas de passagem dos vórtices sobre a crista

2.3 Bóias de Superfície e Flutuadores ARGO

De modo a completar a informação obtida a partir das trajetórias dos vórtices foram utilizados dados de trajetórias e velocidades de boias de superfície e flutuadores ARGOS. No total contou-se com dados de 1856 boias, disponíveis em <http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/index.php>, fazendo parte do Global Drifter Program e de 314 flutuadores ARGO, disponíveis em <http://apdrc.soest.hawaii.edu/projects/yamaha/>.

As boias apresentam uma frequência de amostragem de 6 horas, sendo, na realidade, estes valores resultados de interpolações de valores obtidos ao longo do dia. Os flutuadores ARGO têm uma frequência de 10 dias, viajando a uma profundidade fixa de 1000m. Ao fim do nono dia estes flutuadores viajam até aos 2000m, obtendo-se um perfil de salinidade e temperatura aquando da sua subida até à superfície. Assim, se o vórtice não for suficientemente profundo (>1000m), é por vezes difícil para um ARGO seguir um vórtice durante longos períodos de tempo, principalmente se existir na região topografia mais superficial.

Cálculo das velocidades de rotação:

A velocidades de rotação apresentadas no capítulo 3.3 relativas às boias de superfície e aos ARGO foram obtidas utilizando a equação (7), tendo sido posteriormente suavizada em 30%, utilizando a função rloess¹⁰.

$$U_r = \sqrt{(u - \bar{u})^2 + (v - \bar{v})^2} \text{ (cm/s)} \quad (7)$$

Onde \bar{u} e \bar{v} são a velocidade de translação média dos flutuadores na direção zonal e meridional, respetivamente.

¹⁰ Esta função realiza uma regressão local ajustando uma curva aos dados utilizando o método dos mínimos quadrados (atribuindo um peso menor aos *outliers*) e um modelo polinomial de 2º grau.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Global

A filtragem e análise dos dados de deteções resultaram num total de 3770 deteções de vórtices na região de estudo (figura 4) para o período entre 04/10/1992 e 04/04/2012, entre as quais, 1925 ciclones e 1845 anticiclones. Destas foram seleccionadas aquelas cujo o tempo de trajetória era superior a 8 semanas (trajetórias com 8 pontos ou mais) no interior da região em estudo, obtendo-se um total de 1960 deteções: 1033 ciclones e 927 anticiclones. As deteções de vórtices serão denominadas de vórtices deste ponto em diante apenas por uma questão de comodidade. É importante frisar que toda a análise feita neste trabalho tem por base as trajetórias de vórtices discutidas no capítulo 2.2, podendo estas, por vezes, corresponder a falsas trajetórias (variações significativas da mesma devido ao facto dos vórtices serem detetados a partir de mapas com uma frequência de 7 dias) ou mesmo a estruturas diferentes ao longo da mesma trajetória.

Na tabela 2 encontra-se sumariado o número de vórtices detetados na região no que respeita o início e fim de deteção, quer a nível de ano, quer a nível de localização da mesma. É de notar que, do total de vórtices detetados na região em estudo, apenas 9% têm início fora desta. As trajetórias do total de vórtices detetados na região encontram-se representadas nas figuras 10-A e 11-A para o caso de estruturas ciclónicas e anticiclónicas, respetivamente.

Tabela 2 - Número de vórtices detetados na região de estudo. Não existem vórtices com início de deteção posterior a 31/12/2011, nem com fim de deteção anterior a 01/01/1993.

		Início deteção		Total	Fim deteção		Total	
		Em 1992	[1993-2011]		[1993-2011]	Em 2012		
# Vórtices	Ciclones	20	1013	1033	1018	15	1033	
	Anticiclones	10	917	927	909	18	927	
	Total	30	1930	1960	1927	33	1960	
		Do total de deteções			Dos que têm início no interior da região			
		Início deteção			Fim deteção			
		Dentro região	Fora região		Dentro região	Fora região		
	Ciclones	938	95	1033	877	61	938	
	Anticiclones	843	84	927	816	27	843	
	Total	1781	179 (9%)	1960	1693	88	1781	
					Início deteção	Fim deteção		
					Em 1992	Em 2012		
	Ciclones					18	12	30
	Anticiclones					8	17	25
	Total					26	29	55

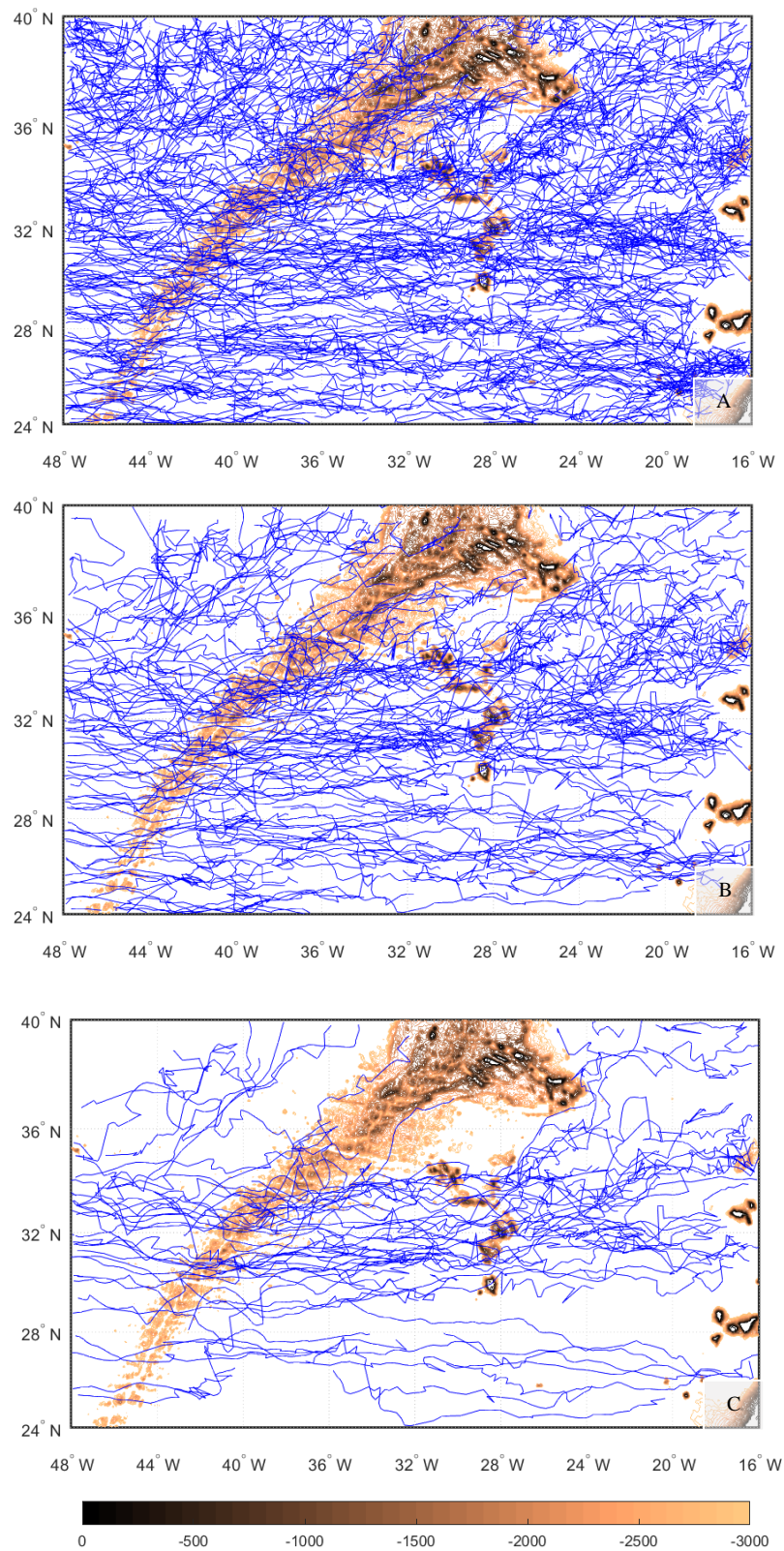


Figura 10 - Ciclones detetados na região de estudo cujo tempo de trajetória é superior respetivamente a (de cima para baixo): 8 semanas, 26 semanas e 52 semanas. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m.

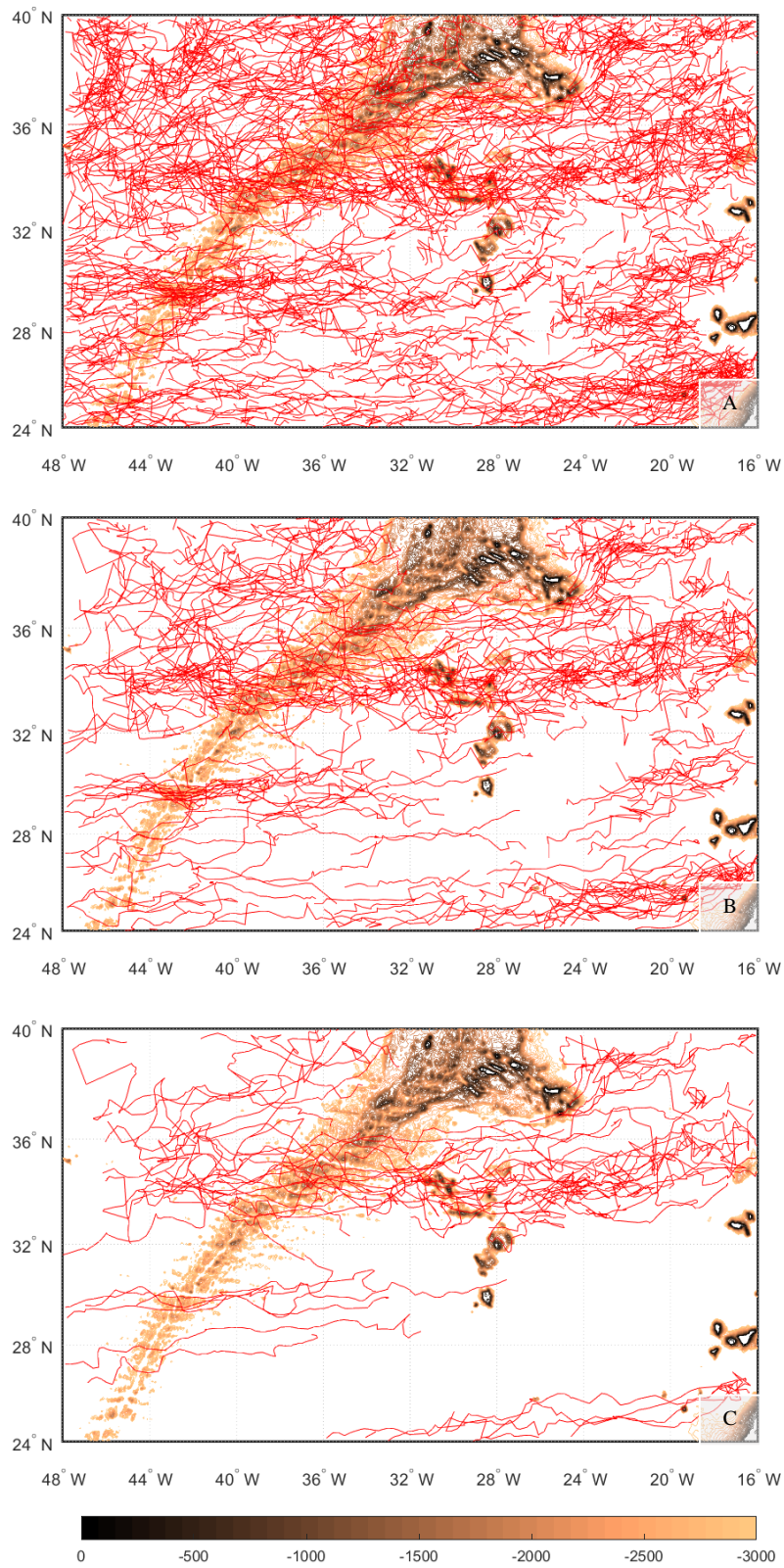


Figura 11 - Anticiclones detetados na região de estudo cujo tempo de trajetória é superior respetivamente a (de cima para baixo): 8 semanas, 26 semanas e 52 semanas. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m.

É possível observar alguns locais, nomeadamente nas regiões em torno dos arquipélagos dos Açores, da Madeira e das Canárias, onde não existem quaisquer trajetórias de vórtices de ambas as polaridades - deserto de vórtices¹¹. Existem outras regiões, no caso dos anticiclones (figura 11-A), onde estes desertos de vórtices são também visíveis. Salientam-se quatro regiões, relativamente extensas, centradas a 32°N,23°W; 28°N,26°W; 31°N,32°W e 27°N,38°W. Na realidade, aparenta existir um corredor por volta dos 32°N onde as trajetórias deste tipo de vórtices são mais escassas ou mesmo inexistentes. A escassez destas estruturas poderá estar relacionada com a sua tendência a formarem-se na zona a Norte do eixo da AzC (acima dos 34°N). Por outro lado, seria de esperar que existisse um corredor semelhante na região Norte da corrente onde não existisse trajetórias de ciclones, mas tal não acontece, como é possível observar na figura 10-A. Tal facto poderá levar a concluir que as estruturas ciclónicas terão uma tendência para se formar em toda a região associada ao eixo principal da corrente. Contrariamente aos desertos de vórtices, existem regiões com grande concentração de trajetórias de vórtices de ambas as polaridades. Estas regiões situam-se, para além do eixo principal da corrente, a Sudoeste dos arquipélagos da Madeira e das Canárias, denominadas respetivamente de Corredor de Vórtices da Madeira e Corredor de Vórtices das Canárias. A energia cinética turbulenta associada ao eixo principal da corrente e à região das Canárias é bastante elevada, atingindo valores superiores a 160cm²/s² em ambas as regiões (figura 12). É de notar que os valores mais elevados de EKE cerca dos 34°N acompanham o eixo médio da AzC traçado, neste caso, para o período entre 1995 e 2006, de acordo com **LÁZARO et al, 2013**. Existe uma outra região centrada aos 30°N,43°W, a Sul da falha Atlantis, onde existe uma grande concentração de trajetórias de vórtices anticiclónicos (figura 11-A). Estas trajetórias têm a sua origem de deteção cerca dos 38°W (figura 39 em anexo), estando muito possivelmente relacionadas com a recirculação do ramo Oeste da AzC (figura 1).

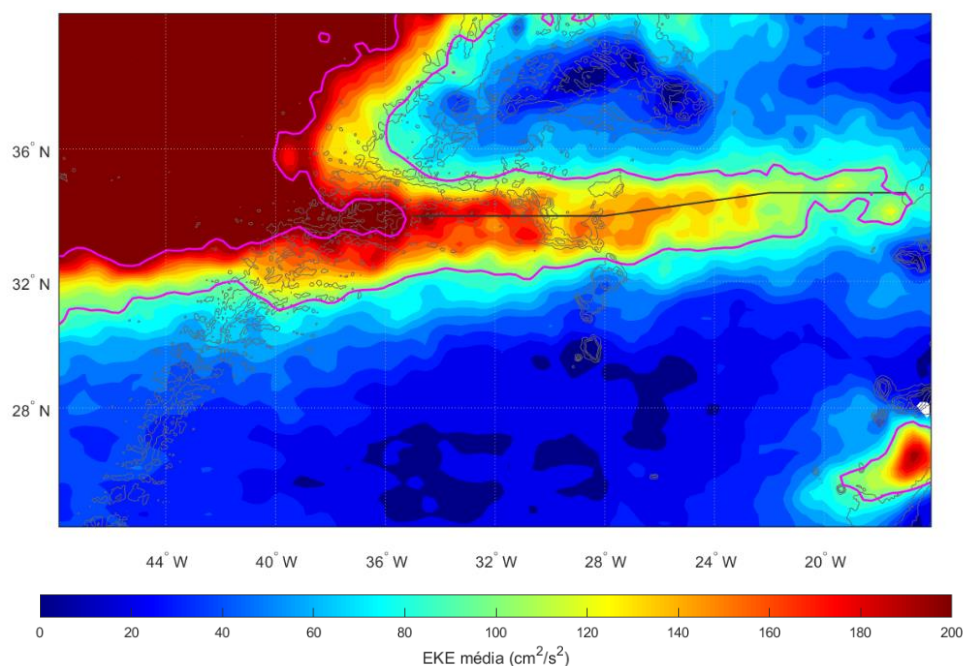


Figura 12- Mapa da EKE média para o período compreendido entre 02/01/1993 e 02/01/2012. O traço a preto representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. Os contornos a roxo representam valores de EKE de 100 e 200cm²/s². As batimétricas encontram-se representadas a cada 1000m, desde a superfície até aos 3000m.

¹¹ Este termo é utilizado em **CHELTON et al, 2011** para designar os desertos de vórtices encontrados no oceano Pacífico onde não existem quaisquer deteções de vórtices, ou seja, tendo em conta uma visão global dos vórtices detetados. Neste caso o termo é utilizado de uma forma regional para definir regiões onde a deteção e correspondentes trajetórias destas estruturas é escassa ou mesmo inexistente.

Filtrando as trajetórias dos vórtices detetados, tendo em conta a sua duração é possível observar uma maior polaridade relativamente ao eixo da corrente. A Este da crista, existe um maior número de ciclones a Sul e de anticiclones a Norte (figuras 10-B e C e 11- B e C), refletindo assim a assimetria típica de formação de meandros/vórtices associada à corrente. É possível também notar maior densidade de trajetórias nos corredores de vórtices da Madeira e das Canárias bem como no corredor associado à falha Atlantis, no caso dos anticiclones. Existe uma diferença de percentagem de vórtices de ambas as polaridades (cerca de 5%), com tempos de trajetória superiores a 8 semanas, diferença esta que sofre um aumento para tempos de trajetória superiores (tabela 3). É interessante notar que para tempos superiores a 104 semanas (2 anos) existe uma inversão na percentagem de vórtices detetados, podendo levar a concluir que os anticiclones têm um tempo de vida superior. Não foi feita nenhuma análise em particular para estes vórtices com tempo de propagação elevado.

Tabela 3 - Percentagem de vórtices na região de estudo em função do seu tempo de trajetória.

		Tempo Trajetória (semanas)				
		≥ 8	≥ 26	≥ 52	≥ 78	≥ 104
# Vórtices (%)	Ciclones	52.70	54.42	57.64	56.82	40
	Anticiclones	47.30	45.58	42.36	43.18	60

O tempo de trajetória predominante dos vórtices detetados na região de estudo situa-se entre as 8 e as 34 semanas, atingindo algumas trajetórias uma duração superior a 164 semanas (1 ciclones e 2 anticiclones) (figura 40¹² - esquerda). A grande maioria dos vórtices apresentam amplitudes máximas entre 1 e 11cm, existindo 20 ciclones e 10 anticiclones com amplitude superior a 26cm (figura 40 - direita). No que respeita à dimensão dos mesmos a nível de raio máximo os valores abrangem o intervalo entre os 82 e os 170km na sua maioria (figura 40 - centro). Existem vórtices cujos valores das características aqui referidas se encontram fora dos limites dos histogramas, encontrando-se estes sumarizados na tabela 7 em anexo.

Com base na análise da localização dos vórtices, tendo por base a amplitude máxima atingida durante a sua trajetória (figura 13), é possível verificar, tal como seria esperado, que a maioria dos vórtices com maiores amplitudes (>15cm) atingidas na sua trajetória, têm o seu início de deteção na zona Oeste da crista (figura 13-C e G), acima dos 32°N, já na zona de influência da Corrente do Golfo. Para além desta região, salienta-se também a zona da corrente dos Açores e as regiões associadas aos Arquipélagos da Madeira e das Canárias, embora estas últimas apresentem um número muito menor de deteções. Tal como no caso da filtragem com base no tempo de trajetória, existe uma intensificação da concentração de vórtices na zona Norte da região de estudo à medida que se aumenta o máximo de amplitude atingida na trajetória. Este facto poderia levar a concluir que vórtices com maiores amplitudes têm tempos de trajetória superiores. No entanto, as regiões com maior energia (ou seja, com valores de EKE elevados), como por exemplo a região a Oeste da Crista, estão em constante modificação, podendo o tempo total de trajetória dos vórtices presentes nesta zona ser curto, embora a sua amplitude seja bastante elevada. Ainda no que respeita a amplitude máxima atingida na trajetória dos vórtices desta região, salienta-se o facto do maior número de vórtices detetados (27 vórtices ciclones e 10 anticiclones), com uma amplitude superior a 5cm (figuras 13-A e E), terem o seu início de deteção a Sul do arquipélago das Canárias.

¹² A figura 40 encontra-se em anexo.

No que respeita ao número de vórtices detetados por ano, existe uma média de 13.21 ciclones e de 10.26 anticiclones por ano na região, para uma amplitude máxima atingida superior ou igual a 10cm, contabilizando um total de 23.47 vórtices por ano (tabela 4). Para este cálculo foi excluído o ano de 1992 por não corresponder a um ano completo de deteções. Com base numa análise muito geral da figura 14, pode concluir-se que existem tantos inícios de deteção por ano como fins, sendo o número de inícios de deteção ligeiramente superior. O número máximo ciclones verifica-se em 2002 (20) e de anticiclones em 2001 (16 deteções).

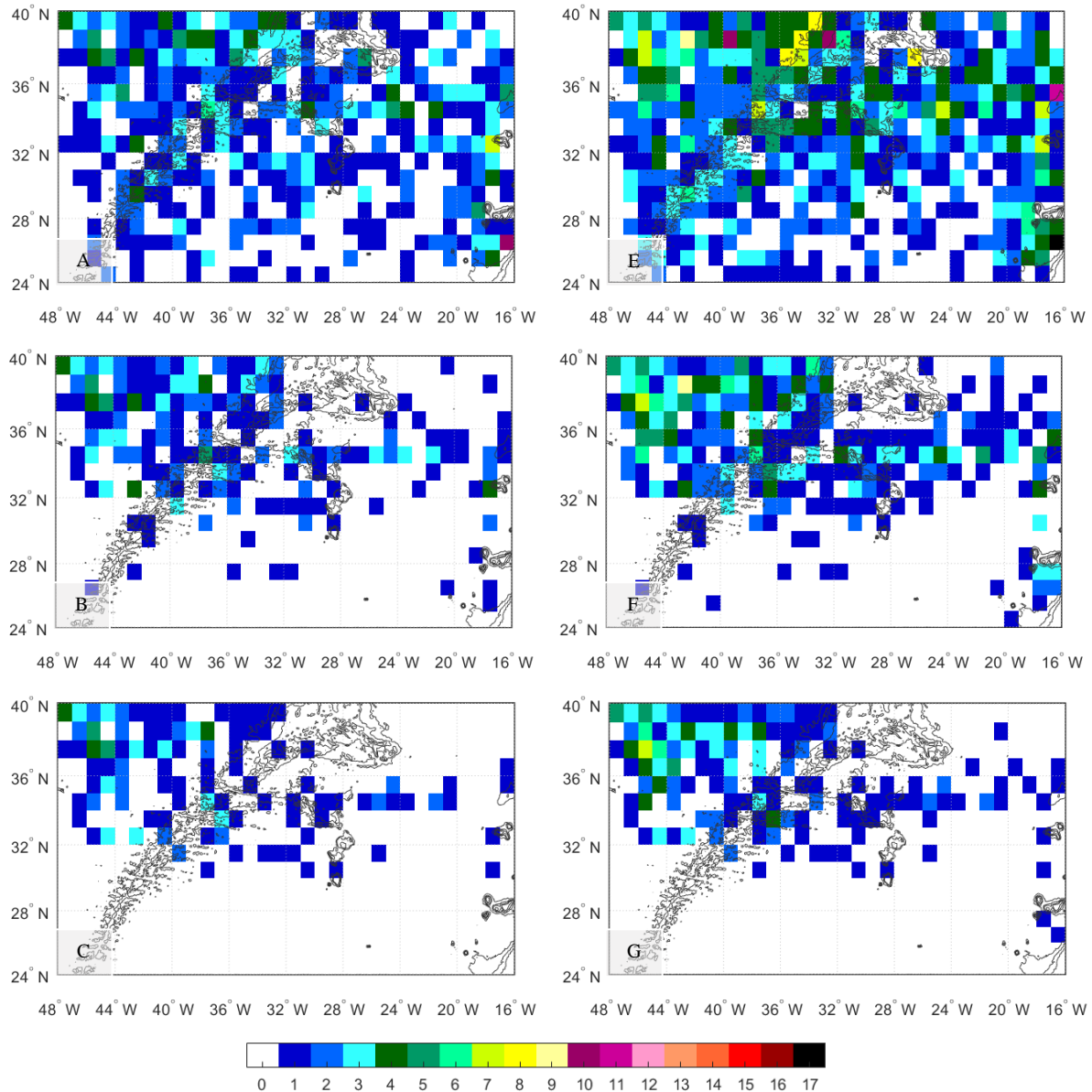


Figura 13 - Número de ciclones (direita) e anticiclones (esquerda) com início de deteção em cada caixa, que atingem na sua trajetória valores de amplitude respetivamente, de cima para baixo, superiores a 5, 10 e 15cm. As caixas têm uma dimensão de $1^\circ \times 1^\circ$. As batimétricas encontram-se representadas a cada 1000m, desde a superfície até aos 3000m.

Quanto a mínimos, estes são verificados em 1995 e 1997 no caso dos anticiclones e em 2003 e 2010 para os ciclones. Não foi possível encontrar nenhum tipo de padrão no que respeita o número de vórtices detetados por ano.

Tabela 4 - Número de vórtices detetados por ano com amplitudes superiores a 5, 10 e 15 cm para a região estudada

		Amplitude ^{máx} (cm)		
		≥ 5	≥ 10	≥ 15
# Vórtices	Ciclones	600	251	150
	Anticiclones	470	195	85
	Total	1070	446	235
	Total/ano	56.32	23.47	12.37

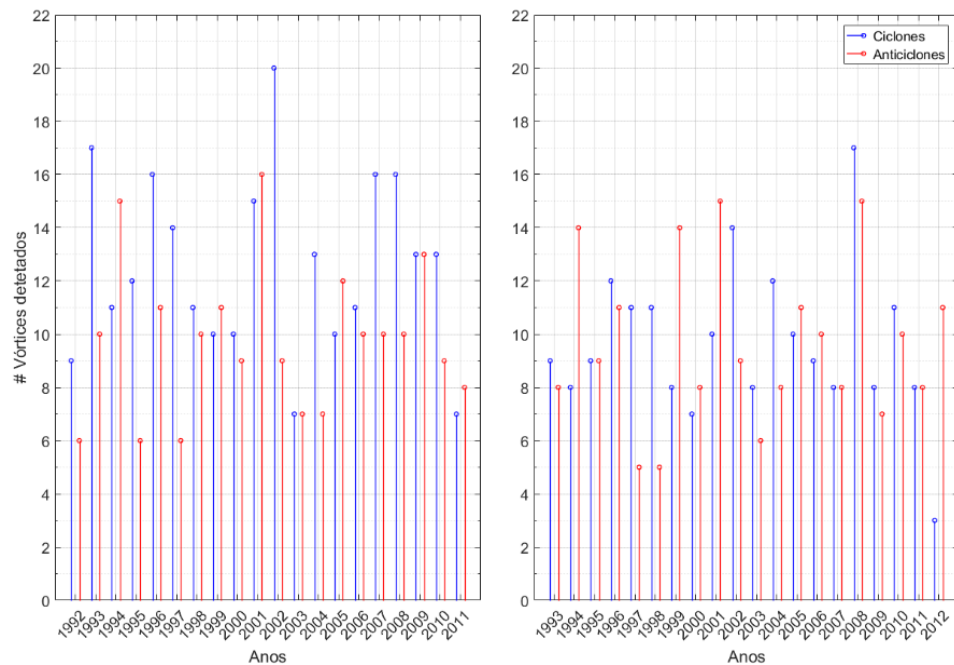


Figura 14 - Número de vórtices com início (esquerda) e fim (direita) de deteção em cada ano, cuja amplitude máxima atingida na sua trajetória é superior ou igual a 10cm.

3.2 Região associada ao eixo principal da AzC

O número total de vórtices cujo início de deteção se encontra no interior da região associada ao eixo principal da corrente dos Açores, a Este da MAR, foi de 461, entre os quais 249 ciclones e 212 anticiclones (figuras 15-A e B). De um modo geral, observa-se que, enquanto as trajetórias de anticiclones se localizam maioritariamente a Norte do eixo da AzC, as trajetórias de ciclones abrangem toda a área. É de notar, no caso dos ciclones, a existência de duas zonas, uma centrada aos 36°N,28°W onde estas trajetórias são inexistentes (deserto de vórtices), e outra localizada aos 34°N,20°W, onde estas são bastante escassas. A observação destas duas regiões não era possível na análise feita na secção 3.1, significando assim que as trajetórias que atravessam estas zonas têm uma origem exterior à região associada ao eixo da AzC. No caso de anticiclones continua a ser bem visível a faixa latitudinal centrada

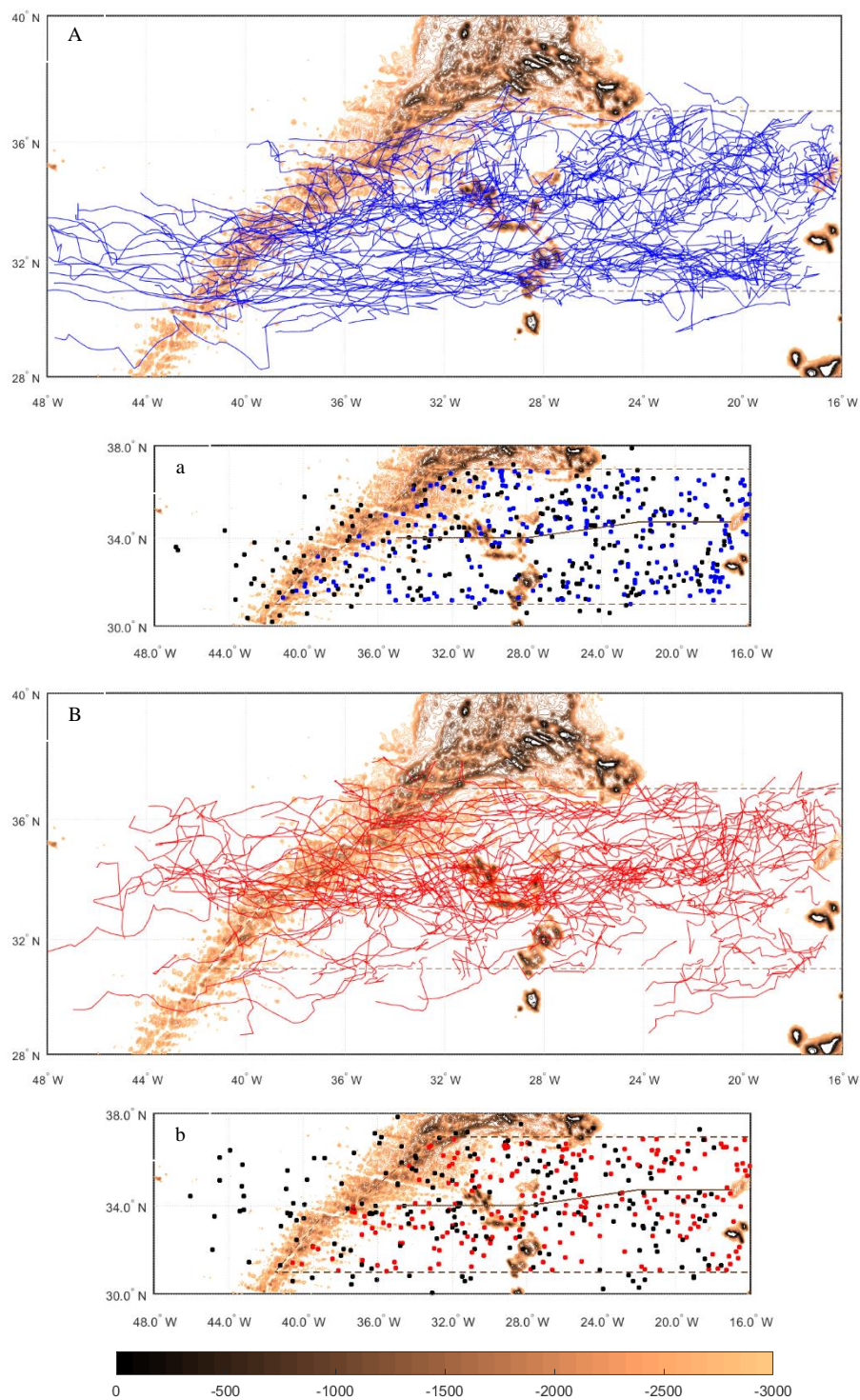


Figura 15 - Trajetórias de ciclones e anticiclones (A e B, respetivamente) detetados na região da corrente dos Açores. Inícios (azul e vermelho) e fins (preto) de deteção destes vórtices (a e b). Existem vórtices com fim de deteção para além dos limites do mapa. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m. O traço preto representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a tracejado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.

aos 32°N, na qual existe alguma escassez de trajetórias. De uma forma geral observa-se uma ligeira deflexão das trajetórias dos ciclones para Sudoeste junto ao flanco Este da crista, sendo esta menos clara no caso dos anticiclones (figuras 15-A e 15-B). Esta deflexão poderá estar possivelmente relacionada com a influência da topografia (MAR) nos vórtices em profundidade originado numa primeira

aproximação pelo efeito do β -topográfico. Analisando as localizações dos inícios de detecção dos vórtices nesta região (figuras 15-a e b) é possível notar que a detecção destes é feita maioritariamente nos bordos de pequenas circunferências (mais perceptível no caso dos ciclones) podendo estar este facto relacionado com os meandros associados à corrente.

O tempo de trajetória destes vórtices têm uma duração predominante entre as 8 e as 34 semanas, atingindo algumas detecções uma duração superior a 164 semanas (2 ciclones e 2 anticiclones) - figura 41¹³-A esquerda. A grande maioria dos vórtices detetados apresentam amplitudes máximas entre 1 e 16cm, existindo 2 ciclones com amplitude superior a 26cm (figura 41-A direita). No que respeita ao raio máximo, os valores estão na sua maioria no intervalo 60 a 170km (figura 41-A centro). Fazendo uma análise para estes vórtices semelhante à realizada na secção 3.1 relativamente à amplitude máxima atingida na sua trajetória (figura 16) observa-se que os vórtices cuja a amplitude é superior a 15cm nesta região (figura 16-C), têm o seu início de detecção a Oeste dos montes submarinos situados aos 28°W e a Norte do eixo médio da corrente, estando estas zonas associadas a valores de EKE superiores (figura 12). O número de vórtices detetados por ano tem um valor de 4.06 ciclones e de 3.26 anticiclones com amplitudes máximas atingidas superiores ou iguais a 10cm, num total de 7.32 vórtices por ano (tabela 5). Para este cálculo foi excluído o ano de 1992 por não corresponder a um ano completo de detecções. O número máximo de detecções é verificado para os ciclones em 2007 (7) e para os anticiclones em 1994 detecções e em 1994 com o mesmo número de detecções.

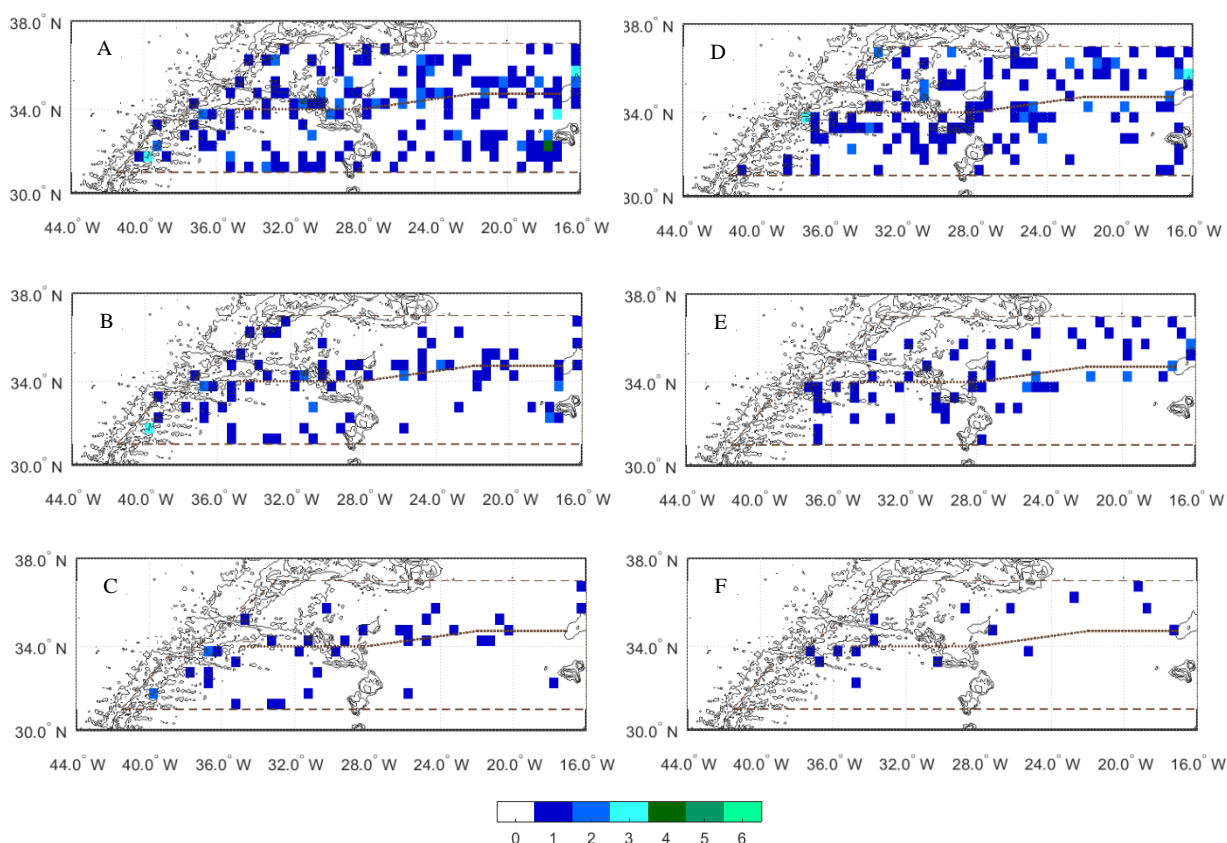


Figura 16- Número de ciclones (esquerda) e anticiclones (direita) com início de detecção em cada caixa, que atingem na sua trajetória valores de amplitude respetivamente, superiores a 5 (A e D), 10 (B e E) e 15cm (C e F). As caixas têm uma dimensão de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. As batimétricas encontram-se representadas a cada 1000m, desde a superfície até aos 3000m. O pontilhado representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a tracejado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.

¹³ A figura 41 encontra-se em anexo.

Quanto aos valores mínimos, estes são verificados em 1995 e 2005 no caso dos anticiclones e em 1995 e 2011 para os ciclones.

Tabela 5 - Número de deteções de vórtices por ano com amplitudes superiores a 5, 10 e 15 cm para a região associada ao eixo principal da corrente.

		Amplitude ^{máx} (cm)		
		≥ 5	≥ 10	≥ 15
# Vórtices	Ciclones	180	77	33
	Anticiclones	142	62	16
Total		322	139	49
Total/ano		16.95	7.32	2.58

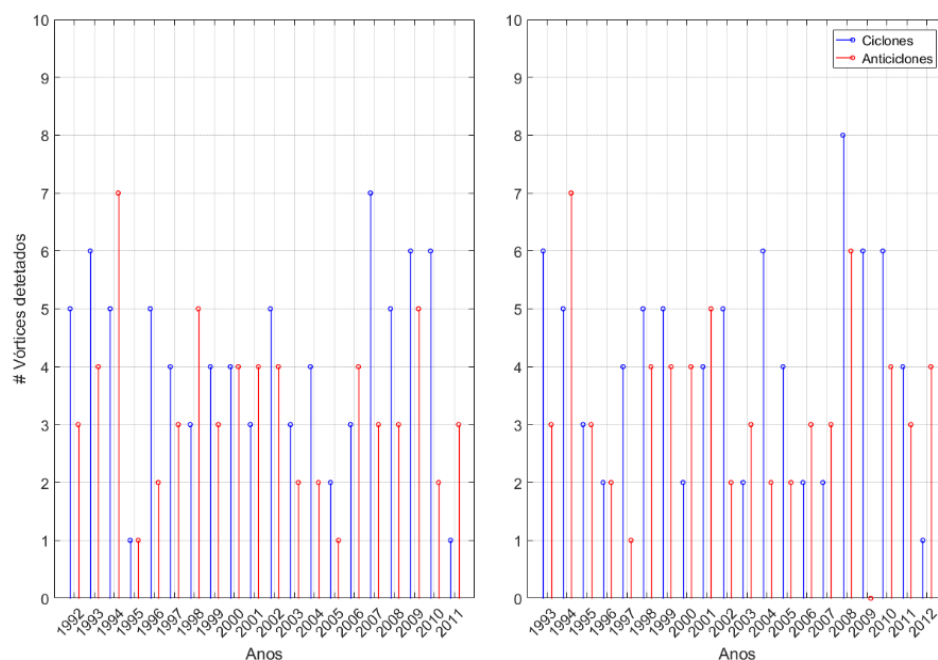


Figura 17 - Número de vórtices detetados com início (esquerda) e fim (direita) de deteção em cada ano, na região associada à corrente dos Açores, cuja amplitude máxima atingida na sua trajetória é superior ou igual a 10cm.

Na figura 18 encontram-se representadas as velocidades médias de translação dos vórtices cuja amplitude máxima atingida na sua trajetória é superior ou igual a 10cm, bem como o seu diâmetro médio associado. Observa-se, de uma forma geral que estas velocidades têm valores iguais ou inferiores a 5cm/s, sendo, em alguns casos, ligeiramente superior aos valores obtidos em outros estudos (2-3cm/s). Os valores extremos de velocidade poderão estar associados a problemas e falhas na deteção já referidos (falsas deteções e saltos nas trajetórias). A direção é aproximadamente zonal, nomeadamente à latitude do eixo médio da corrente. A dimensão destas estruturas é bastante elevada, existindo algumas com valores de raio superiores a 100km, principalmente no caso dos anticiclones.

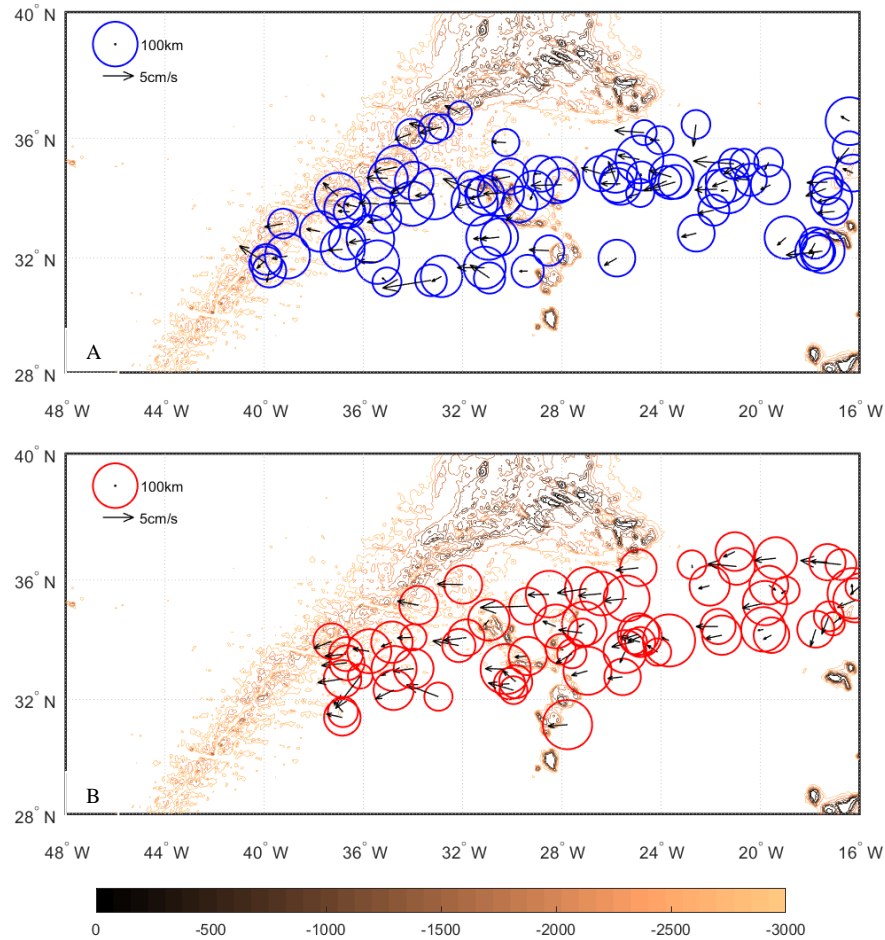


Figura 18 - Distribuição geográfica dos vórtices associados ao eixo principal da AzC, cuja amplitude máxima atingida na sua trajetória é superior ou igual a 10cm. A) Ciclones e B) Anticiclones. As setas representam a velocidade média de translação associada a cada uma destas estruturas e os círculos os seus raios médios correspondentes. O valor de 100km corresponde ao raio do círculo. As batimétricas encontram-se representadas em intervalos de 500m. A localização de cada vórtice refere-se à sua origem de deteção.

3.2.1 Passagem sobre a crista

Dos vórtices com início de deteção na região da corrente apenas 58 cruzam a crista, dos quais 32 ciclones e 26 anticiclones (figuras 19-A e B), correspondendo apenas a 12,58% do total de vórtices. Destes, 38 cruzam a crista sem migrar ao longo desta: 19 ciclones e 19 anticiclones (figuras 19-a e b). É interessante notar que 29 dos 58 vórtices (15 ciclones e 14 anticiclones) têm um início de deteção já sobre o flanco Este da crista, estando a sua origem muito possivelmente relacionada com os processos de separação e de *streamer* que ocorrem nesta região.

Existe uma diferença bastante marcante na localização das trajetórias dos vórtices de ambas as polaridades, existindo uma maior concentração de anticiclones a norte do eixo da corrente e de ciclones a sul. Observando apenas estes vórtices é mais evidente a deflexão dos ciclones referida anteriormente. Considerando os vórtices que não migram ao longo da crista (figura 19-a e b) verifica-se que o seu trajeto é aproximadamente zonal, excetuando os casos dos ciclones cujo início de deteção se encontra a Este dos montes submarinos (localizados aos 28°W), passando preferencialmente entre os montes Plato e Irving (figura 18-a). No caso dos anticiclones (figura 19-b) é mais nítida a sua deflexão, para Noroeste, após a passagem sobre a MAR.

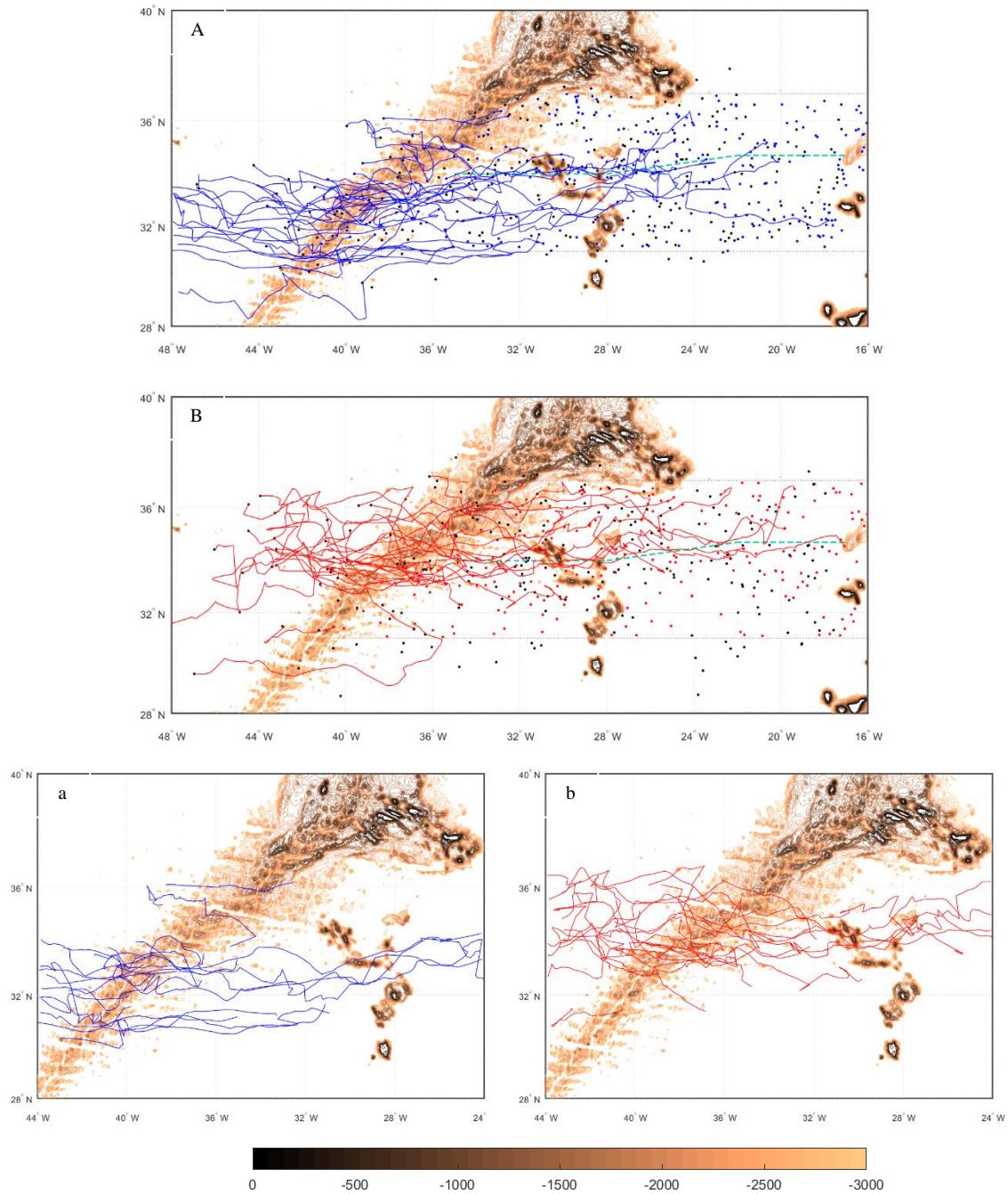


Figura 19 - Trajetórias dos vórtices detetados na região da AzC (A-ciclones e B- anticiclones) que cruzam a crista com respetivos inícios e fins de deteção. Trajetórias de vórtices (a-ciclones e b-anticiclones) que apenas passam sobre a crista sem migrar ao longo desta. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m. O tracejado verde representa o eixo médio da corrente para o representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a pontilhado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.

A latitude preferencial de passagem dos anticiclones sobre a crista apresenta uma faixa mais restrita, entre os 33°N e 35°N, quando comparada com os ciclones, que se estende a uma faixa latitudinal maior, entre os 30°N e os 34°N (figura 20-A), tal como antes observado nas figuras 19-A e B. É de notar que a passagem sobre a crista tem como eixo latitudinal, na sua maioria, a falha de Hayes, estando muito possivelmente relacionado com os valores extremamente baixos da batimetria. A análise qualitativa da forma de passagem dos vórtices sobre a crista, observando as imagens sequenciais dos mapas de SLA, é bastante complexa nesta região uma vez que estes sofrem bastantes processos de interação entre si,

sendo por vezes difícil distinguir entre estes, principalmente entre o processo de separação e de *streamer*. Tal como referido no capítulo 2, a forma de passagem foi definida aquando da interseção da trajetória do vórtice com o eixo da crista. Assim, e dada a extensão zonal da crista, é difícil identificar uma única forma de passagem sobre esta ou mesmo um único processo de interação entre vórtices. No entanto, pode concluir-se que no caso dos ciclones, a sua forma preferencial de passagem é como estrutura coerente. Apesar da análise da figura 20-A resultar numa conclusão semelhante, para o caso dos anticiclones, tendo em conta a visualização das imagens sequenciais de SLA, esta conclusão não pode ser retirada dado que estes possuem uma estrutura menos definida (na sua maioria), sendo mais difícil avaliar se a estrutura passa de forma coerente (isto é, sem destabilizar, formar estruturas de vorticidade secundárias, etc.).

O tempo de interação destes vórtices com a MAR (figura 20-B) tem uma predominância entre as 18 e 26 semanas no caso dos ciclones e 34 a 42 semanas para os anticiclones, existindo vórtices (2 ciclónicos e 1 anticiclónico), cujo tempo de interação é superior a 1 ano. É importante notar que muitos destes vórtices têm a sua origem já sobre o flanco Este da crista, migrando ao longo desta antes de a cruzar, tendo como resultado um tempo de interação mais elevado. No que respeita o tempo de trajetória total, estes têm uma duração predominante entre as 34 e as 60 semanas, atingindo algumas deteções uma duração superior a 164 semanas (1 ciclones e 2 anticiclones) - figura 41-B esquerda. A grande maioria dos vórtices detetados apresentam amplitudes máximas entre 6 e 21cm, existindo 2 ciclones com amplitude superior a 26cm (figura 41-B direita). Quanto a raio máximo, na sua maioria, os valores variam entre os 126 e os 170km (figura 41-B centro).

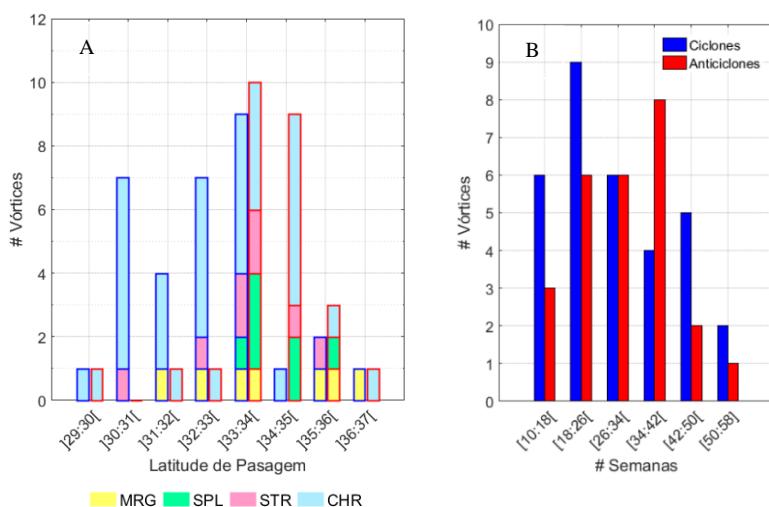


Figura 20 - A) Latitude de Passagem dos vórtices que cruzam a MAR e respetiva forma de passagem: MRG- Coalescência, SPL- Separação, STR- Streamer e CHR- Estrutura Coerente. Os contornos das barras a azul refere-se a ciclones e a vermelho aos anticiclones. B) - Tempo de interação dos vórtices que cruzam a crista com esta.

3.2.2 Migração ao longo da crista

Dos vórtices com início de deteção na região da corrente 31 migram ao longo da crista, dos quais 20 ciclones e 11 anticiclones (figura 21-A e B). Destes vórtices, existem 11 que apenas migram ao longo da crista sem a cruzar: 7 ciclones e 4 anticiclones, como observado nas figuras 21-a e b. É de notar que estes vórtices têm a sua origem a Oeste dos 24°W ou, principalmente, no caso dos ciclones, já sobre a crista. A migração destas estruturas, tal como referido anteriormente resulta do efeito do β -topográfico, que induz a propagação dos vórtices, neste caso com direção para Sul, sobre o flanco Este da MAR.

Existem, no entanto, estruturas que se propagam na direção oposta à esperada, ou seja, para Sul, no flanco Oeste da crista. Exemplos destas estruturas são visíveis na figura 21-B. O vórtice anticiclônico #5617 é um destes casos, sendo apresentado com mais detalhe no subcapítulo 3.3.2.

No que diz respeito ao tempo de interação destes vórtices com a MAR (figura 22), este tem uma predominância entre as 18 e 26 semanas, existindo 20 vórtices com tempos de interação superiores a 6 meses e 3 cujo tempo de interação é superior a 1 ano. Esta interação longa com a MAR é bastante importante do ponto de vista da dinâmica dos ecossistemas marinhos. O tempo de trajetória total destes vórtices têm uma duração predominante entre as 34 e as 60 semanas, não existindo trajetórias com

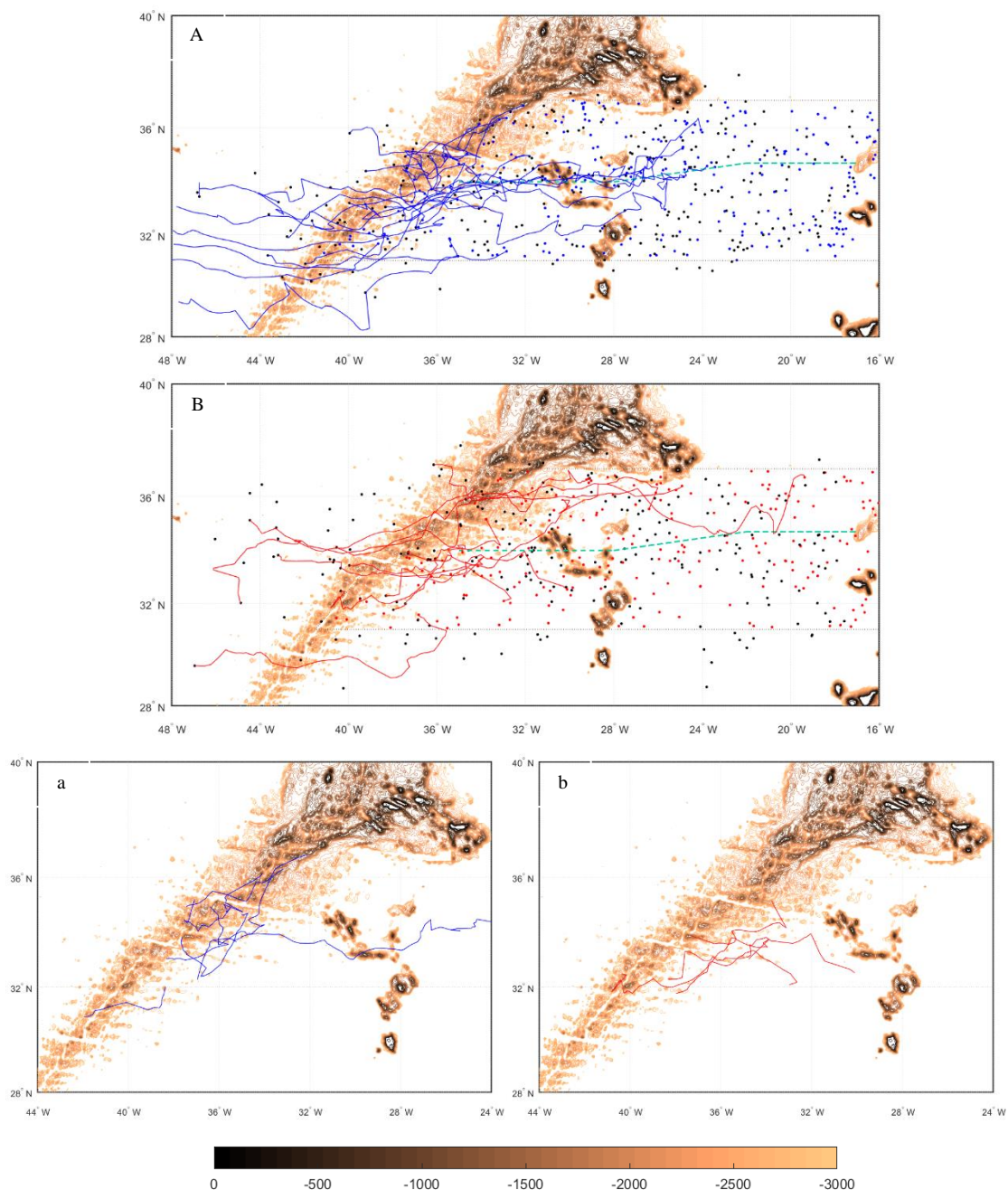


Figura 21 - Trajetórias dos vórtices detetados na região da AzC (A-ciclones e B- anticiclones) que migram ao longo da crista com respetivos inícios e fins de deteção. Trajetórias de vórtices (a-ciclones e b-anticiclones) que apenas migram sobre a crista sem a cruzar. As batimétricas encontram-se representadas a cada 100m desde a superfície até aos 3000m. O tracejado verde representa o eixo médio da corrente para o representa o eixo médio da corrente para o período entre 1995 e 2006. A caixa a pontilhado delimita a região considerada como associada ao eixo principal da corrente.

duração superior a 138 semanas - figura 41-C esquerda. A grande maioria dos vórtices detetados apresentam amplitudes máximas entre 6 e 16cm, existindo 1 ciclone com amplitude superior a 26cm (figura 41-C direita). No que respeita a dimensão dos mesmos a nível de raio máximo, este apresenta valores entre os 148 e os 170km na sua maioria (figura 41-C centro).

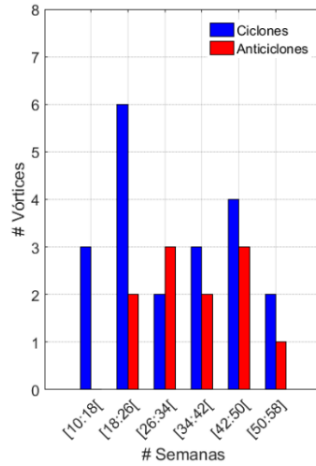


Figura 22 – Tempo de interação dos vórtices que migram ao longo da crista, com esta.

3.3 Casos de Estudo

Os casos de estudo apresentados nesta secção foram escolhidos por duas razões. A primeira prende-se com o facto de três dos vórtices estudados serem seguidos por flutuadores o que permite uma comparação das velocidades de rotação do vórtice, obtidas por diferentes métodos. O primeiro caso, em que o vórtice é seguido por um flutuador ARGO, permite inferir sobre o comportamento do vórtice em profundidade, bem como sobre a sua extensão vertical. O último caso de estudo representa uma interação pouco comum, em que dois vórtices migram ao longo da crista (um em cada um dos flancos desta), sendo que o vórtice no flanco Oeste não segue o trajeto esperado tendo em conta o efeito do β -topográfico. Por esta razão, e por existirem outros vórtices com o mesmo comportamento, foi decidido apresentar este caso de estudo, apesar de não ter sido possível, no decurso deste trabalho, encontrar uma justificação para tal comportamento.

É importante frisar que, apesar das trajetórias dos vórtices utilizadas neste trabalho terem sido obtidas com base em mapas de SSH, optou-se por apresentar nesta secção, não os mapas correspondentes, mas os mapas de SLA dado estes possuírem uma melhor resolução. Ao contrário do trabalho realizado por **CHELTON *et al*, 2011**, este trabalho abrange uma área mais regional, pelo que, não faria sentido utilizar mapas com uma menor resolução. Assim, é esperado que, por vezes, as estruturas visíveis não correspondam exatamente às estruturas detetadas.

3.3.1 #4206

O vórtice **#4206**, ciclónico, é originado por um processo de separação à latitude aproximada de 32.5°N, propagando-se para Sudoeste até atingir a latitude de 31°N, seguindo posteriormente para Oeste sem variação significativa da sua direção. A sua velocidade de propagação (figura 23) apresenta valores semelhantes (inferiores a 5cm/s) no seu percurso até ao momento em que o vórtice inicia a sua interação com a crista. Nesse ponto esta velocidade sofre um ligeiro aumento, sendo este mantido até ao final do trajeto. Esta estrutura é acompanhada por um flutuador ARGO desde a sua deteção inicial, até ao momento em que esta atinge o flanco Este da crista (figura 23), apresentando o ciclone uma estrutura coerente¹⁴ (exemplo na figura 25-A) durante este percurso. Aí o vórtice aparentemente sofre um processo de coalescência com uma outra estrutura ciclónica com alongamento significativo sobre a crista na direção NE-SW (figura 25-B). Observando a figura 26-B, é possível notar no alongamento referido um gradiente da vorticidade menos intenso, traduzindo este uma menor coerência da estrutura. Observa-se também um pequeno filamento de vorticidade com alongamento SE-NW. Analisando as imagens sequenciais (vídeos) dos mapas de SLA e as trajetórias, tanto do flutuador, como do vórtice, é possível verificar que o flutuador perde contacto com o vórtice após este processo. Tal como referido no capítulo 2, o ARGO desce até aos 2000m antes de iniciar a sua ascendência até à superfície, o que pode ter originado a perda do vórtice aquando da sua interação com o flanco Este da crista, dado que a batimetria nesta região atinge valores próximos dos 2000m. A possível coalescência poderá explicar a anomalia positiva do raio do vórtice visível na figura 24-A, até ao dia 16/01 (figura 25-C), onde a estrutura do ciclone tem uma forma mais definida, traduzindo-se por valores de anomalia do raio próximos de zero. Aquando da passagem sobre o eixo da crista, já sobre o flanco Oeste, o ciclone sofre um ligeiro alongamento na direção SE-NW (figura 25-D e figura 26-C), voltando a adquirir uma estrutura coerente após a passagem total (figura 25-E). O vórtice mantém-se coerente até ao fim da sua deteção, deteção esta que é terminada prematuramente (não foi analisado o restante trajeto do vórtice, dado este se situar

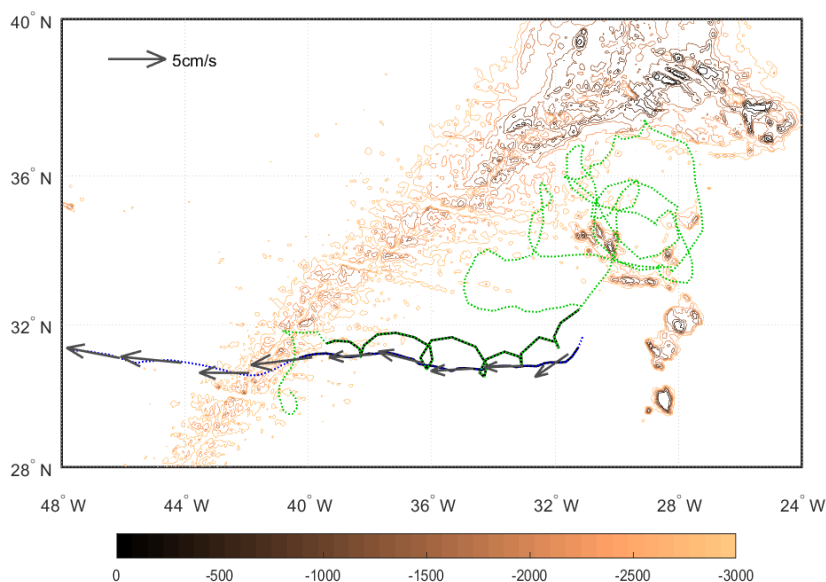


Figura 23 - Mapa das trajetórias completas do ciclone (azul) e o ARGO (verde). O tracejado preto, sobreposto às trajetórias, indicam o intervalo de interação entre o vórtice e o ARGO. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas.

¹⁴ Esta coerência é também visível no mapa de vorticidade relativa, RV (figura 26-A), onde o vórtice apresenta um gradiente bastante elevado dos valores de RV na sua periferia. A não correspondência total do raio do vórtice com o contorno exterior das linhas de vorticidade nos mapas de vorticidade deve-se à diferença de resolução entre os mapas de SSH e SLA.

fora do domínio da região estudada). Na figura 24-B é possível observar a variação da velocidade de rotação do vórtice à superfície, estimada a partir do campo de velocidade geostrófica (associada à SLA) e em profundidade representada pela velocidade de rotação do ARGO, aquando da sua interação com o ciclone, aos 1000m. Estas duas velocidades seguem um padrão semelhante (com uma diferença de 20cm/s aproximadamente), refletindo assim a presença de uma estrutura coerente em profundidade. Dado o facto de o flutuador seguir o vórtice por um período superior a 6 meses, aproximadamente 18 ciclos de medição durante os quais o flutuador se mantém a uma profundidade aproximada de 1000 m incluindo 18 descidas até aos 2000m, pode inferir-se que esta estrutura tinha uma extensão vertical de pelo menos 1000m. A anomalia da amplitude (figura 24-A) sofre uma variação significativa (cerca de 6 cm) antes e depois da passagem sobre o eixo da crista. Analisando esta anomalia sobre o flanco Este da crista, do ponto de vista de conservação da vorticidade potencial¹⁵ conclui-se que: considerando a vorticidade planetária como constante, uma contração vertical do vórtice resulta numa diminuição da vorticidade relativa, com consequente diminuição da velocidade de rotação (figura 24-B antes do dia 16/01/2011) e diminuição da amplitude do vórtice (figura 24-A antes do dia 16/01/2011). Após a passagem para o flanco Oeste, existe um aumento da velocidade de rotação e amplitude do vórtice.

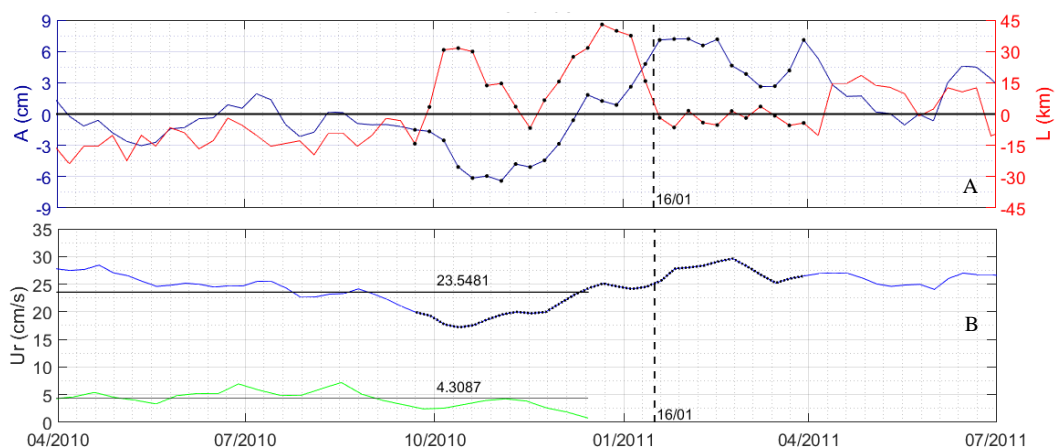


Figura 24 - A) Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice. Os pontos pretos representam os tempos de interação com a crista. B) Velocidade de rotação do vórtice ao longo do seu trajeto (azul) e velocidade de rotação do ARGO (verde). As linhas horizontais cinzentas representam as respetivas médias das velocidades (os valores destas encontram-se sobre a linha). Em A) e B), a linha a tracejado vertical representa a data de interseção da trajetória do vórtice com o eixo central da crista.

¹⁵ Esta análise é válida no caso de o vórtice ser barotrópico. Se o vórtice tiver uma componente baroclínica é necessário fazer esta análise tendo em conta a vorticidade potencial de Ertel. Dado não se dispôr de dados em profundidade, optou-se por apresentar esta análise como se tratasse de um vórtice barotrópico, apesar de este ter, muito possivelmente, uma componente baroclínica.

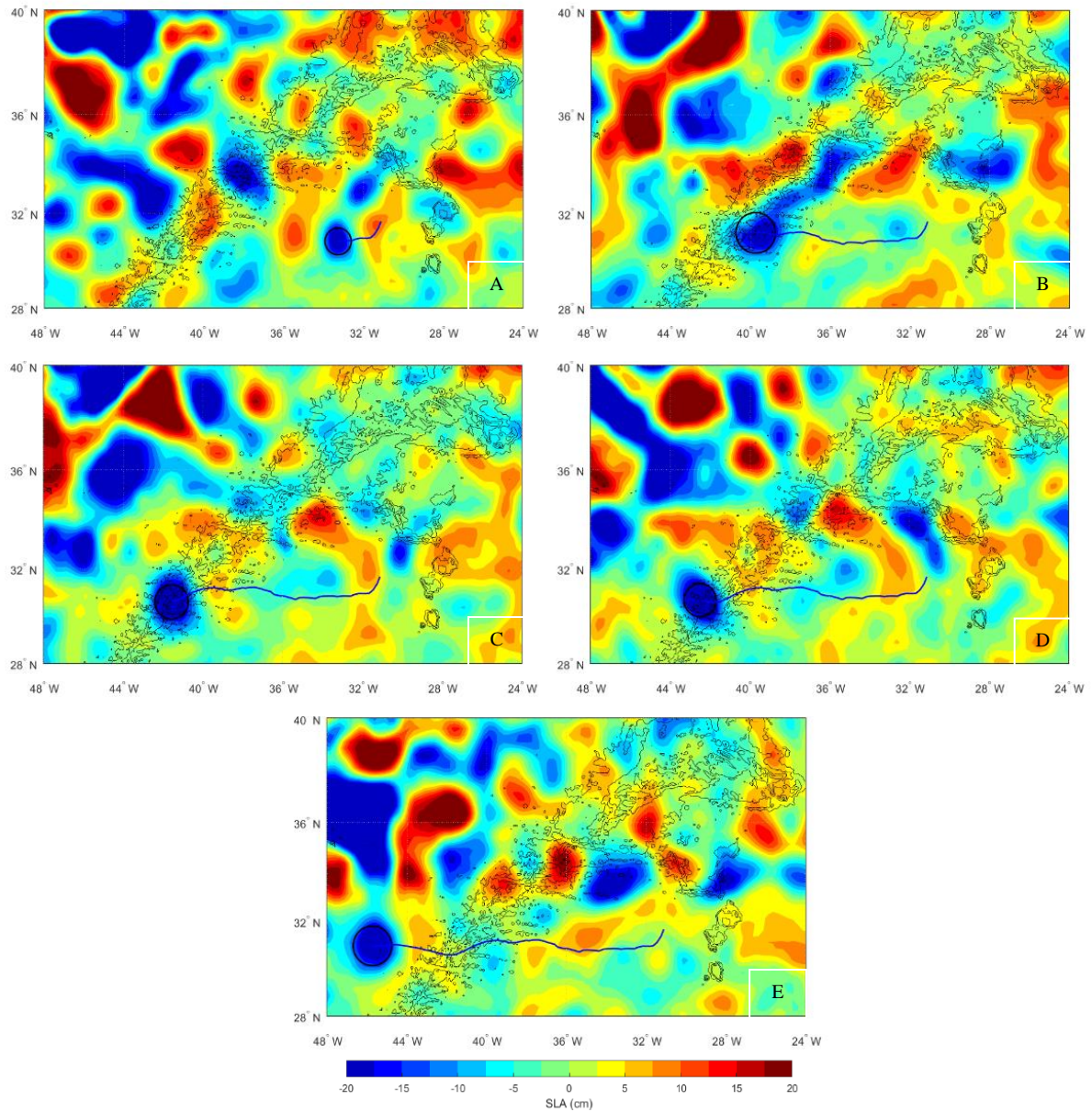


Figura 25 - Mapas de SLA para os dias 05/05/2010-A; 25/11/2010-B; 16/01/2011, C; 15/02/2011-D e 11/05/2011-E. A linha azul representa a trajetória do anticiclone e a circunferência preta o raio do vórtice. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.

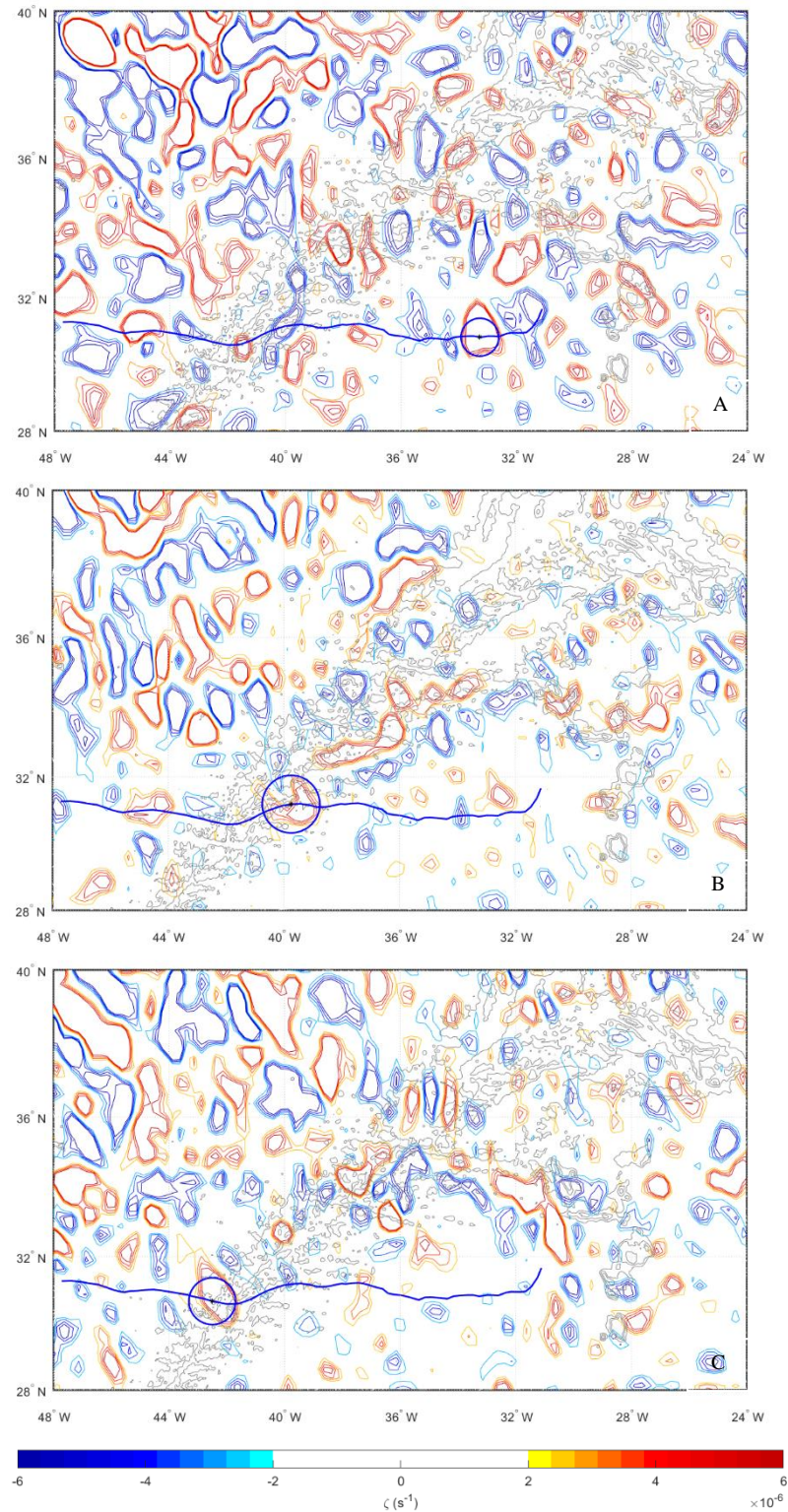


Figura 26 – Mapas de vorticidade relativa para os dias 05/05/2010-A; 25/11/2010-B e 15/02/2011-C. A linha a azul representa a trajetória do ciclone e a circunferência azul o raio do vórtice.

3.3.2 #5617

O vórtice anticiclónico **#5617** é inicialmente detetado cerca dos 36°N,26°W, sofrendo diversos processos de coalescência e separação no seu trajeto inicial, trajeto esse durante o qual este é acompanhado por uma boia de superfície (figura 27). Estes processos explicam a grande variação das anomalias visíveis na figura 28-A, principalmente no que respeita à anomalia do raio. Ao atingir o flanco Este da crista o vórtice sofre um processo de coalescência com outra estrutura mais a Sul (figura 29-A), perdendo a boia o contacto com o vórtice (visível nos vídeos). A velocidade de rotação da boia durante o tempo em que este acompanha o vórtice é cerca de 17.5cm/s, sendo superior em cerca de 5cm/s à

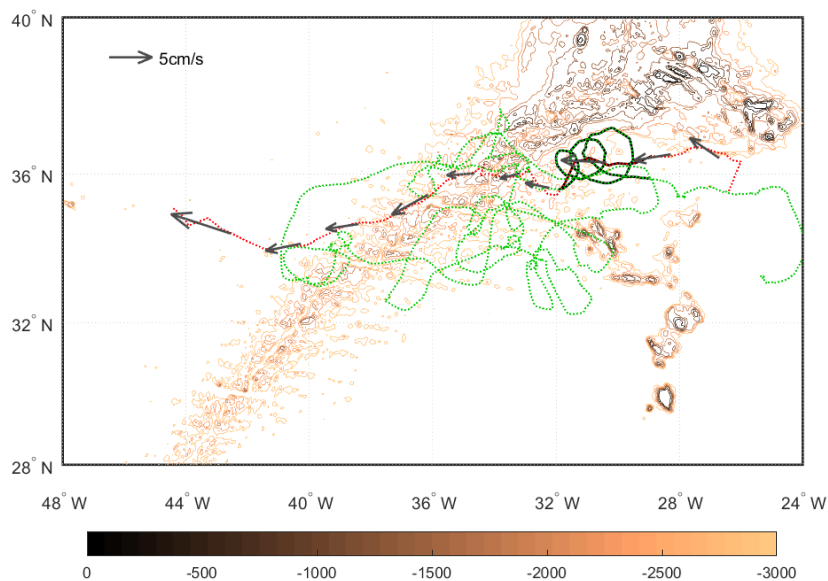


Figura 27 - Mapa das trajetórias completas do anticiclone (vermelho) e da boia de superfície (verde). O tracejado preto, sobreposto às trajetórias, indicam o intervalo de interação entre o vórtice e a boia. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas.

velocidade de rotação (figura 28-B). Tal como referido no capítulo 2, a velocidade de rotação das estruturas detetadas são calculadas com base na velocidade geostrófica do contorno de SSH que define o vórtice, assim esta velocidade de rotação não tem em conta a componente ageostrófica do movimento (como por exemplo o atrito), a qual influência também a velocidade de rotação da boia. No que respeita à velocidade de translação do vórtice (figura 27), esta apresenta valores mais baixos aquando da passagem sobre a crista, sendo esta na primeira parte do percurso aproximadamente zonal. A zona de passagem deste vórtice apresenta uma batimetria com valores próximos dos 500m, podendo estar esta diminuição de velocidade relacionada com os constrangimentos na propagação do vórtice em profundidade. Ao atingir a zona mais central da crista o vórtice intensifica-se, adquirindo uma estrutura mais coerente e sofrendo posteriormente um alongamento ligeiro na direção SE-NW (figura 29-B). Este alongamento pode ser traduzido pela assimetria na mesma direção dos contornos da RV visível na figura 30-A. Nesta região, existe um aumento da velocidade de rotação do vórtice que, em combinação com uma anomalia negativa do raio (figura 28-B, no dia 01/04), poderá indicar uma contração vertical do vórtice, coerente com a análise da conservação da vorticidade potencial¹⁶. Após a passagem sobre o eixo da crista o anticiclone inicia a sua migração ao longo do seu flanco Oeste, intensificando-se ao mesmo tempo que sofre coalescência com outra estrutura, resultando no seu alongamento bastante acentuado

¹⁶ Admitindo que a vorticidade potencial se mantém constante, uma diminuição da profundidade da coluna de água implica um aumento da vorticidade relativa e com consequente aumento da velocidade de rotação (figura 28-B).

sobre a crista na direção NE-SW (figuras 29-C e D). Este processo pode ser identificado nas figuras 28-A e B como um aumento intenso da anomalia do raio, da amplitude e da sua velocidade de rotação, após o dia 01/07/1997, aproximadamente, correspondendo estes valores ao máximo de alongamento da estrutura. Na figura 30-B é possível visualizar o início deste processo que é traduzido pela formação de um filamento de vorticidade de grande dimensão, tanto zonal, como meridional. Após este máximo, a estrutura adquire uma forma mais circular e coerente (figura 29-E), existindo uma ligeira diminuição de ambas as anomalias. Apesar de na figura 29-E o vórtice aparentar ser uma estrutura coerente e de grande dimensão, o mesmo não acontece ao analisar-se o mapa de vorticidade correspondente (figura 30-C). Na realidade, o anticiclone é constituído por uma estrutura menor de vorticidade, existindo mesmo um filamento a interliga-lo com um outro localizado mais a norte. Esta diferença acentuada da definição da estrutura pode dever-se ao facto dos valores de SLA terem sido saturados acima dos 20cm, apresentando-se o anticiclone no mapa de SLA como uma única estrutura. A descida do anticiclone no flanco Oeste da crista constitui, tal como referido anteriormente, um exemplo em que a propagação do vórtice, não segue o trajeto esperado, tendo em conta apenas o efeito do β -topográfico. Após a passagem total sobre a MAR, este vórtice volta a sofrer alguns processos de separação e coalescência até ser prematuramente interrompida a sua deteção.

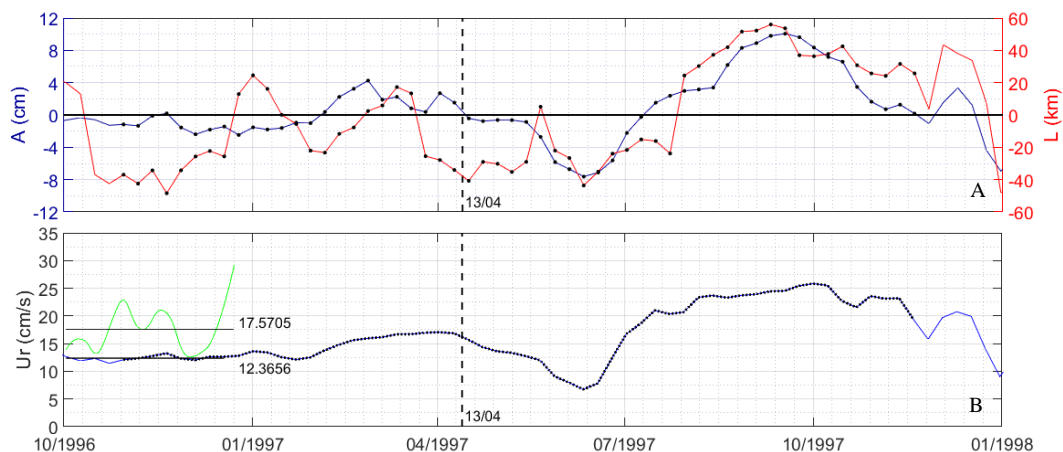


Figura 28 - A) Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice. Os pontos pretos representam os tempos de interação com a crista. B) Velocidade de rotação do vórtice ao longo do seu trajeto (azul) e velocidade de rotação da boia de superfície (verde). As linhas horizontais cinzentas representam as respetivas médias das velocidades (os valores destas encontram-se sobre a linha). Em A) e B), a linha a tracejado vertical representa a data de interseção da trajetória do vórtice com o eixo central da crista.

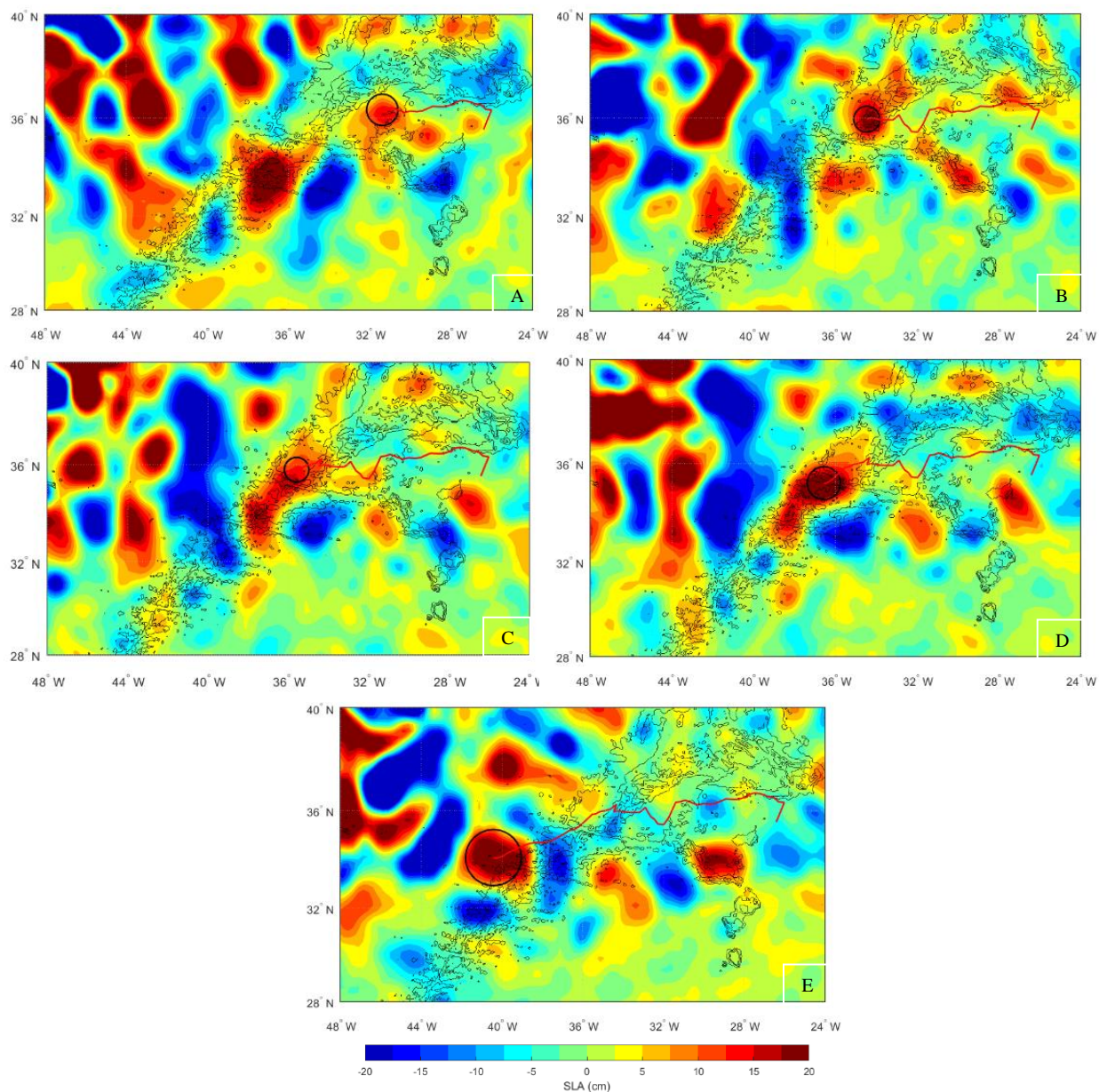


Figura 29 - Mapas de SLA para os dias 02/12/96-A; 13/04/97-B; 06/06/97- C; 02/07/97-D e 14/10/97-E. A linha vermelha representa a trajetória do anticiclone e a circunferência preta o raio do vórtice. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.

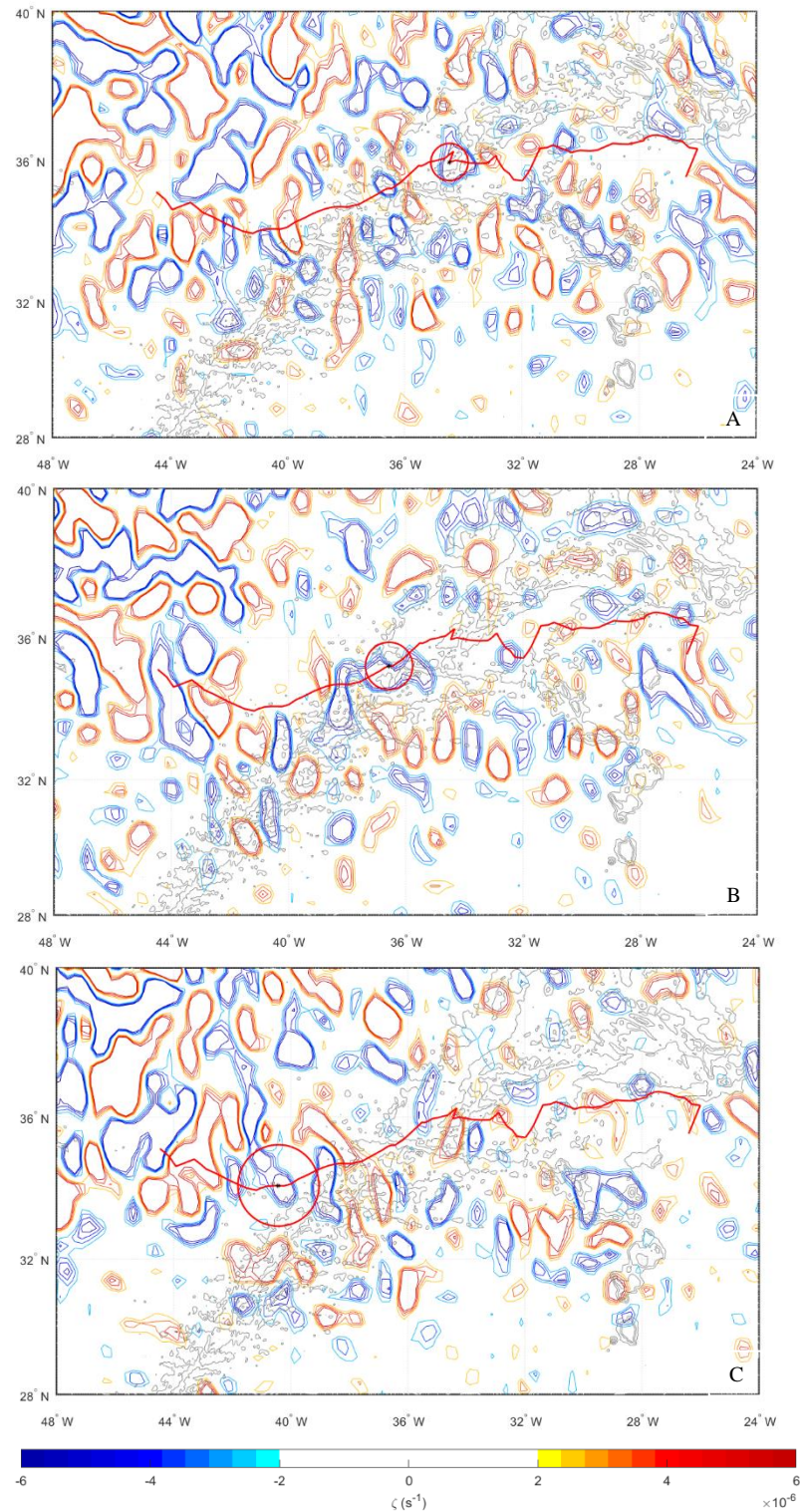


Figura 30 - Mapas de vorticidade relativa para os dias 13/04/1997-A; 02/07/1997-B e 14/10/1997-C. A linha a azul representa a trajetória do anticiclone e a circunferência vermelha o raio do vórtice.

3.3.3 #53

O vórtice **#53**, ciclónico, é inicialmente detetado cerca dos 31°N, 18°W, não fazendo parte do conjunto de vórtices associados ao eixo principal da AzC. Este caso de estudo constitui assim um exemplo de uma estrutura acompanhada por uma boia de superfície (figura 31) durante um período de tempo longo (cerca de 6 meses). Este vórtice apresenta uma estrutura coerente na grande maioria do seu trajeto, após a passagem sobre os montes submarinos Great Meteor e Hyères (figura 33-A, B e C), existindo, no entanto, algumas falsas deteções e saltos entre estruturas¹⁷ até ao momento aproximado em que a boia de superfície é capturada pelo ciclone. A coerência desta estrutura pode ser comprovada tendo em conta

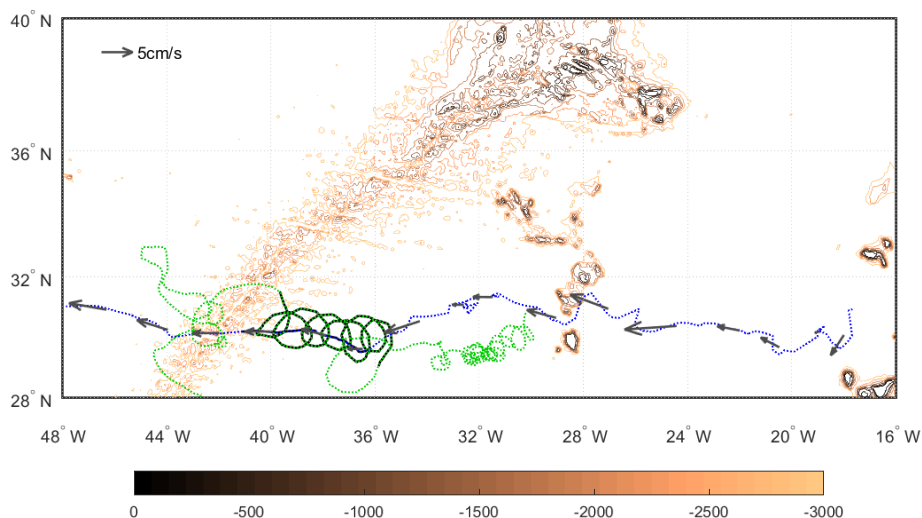


Figura 31 - Mapa das trajetórias completas do anticiclone (vermelho) e da boia de superfície (verde). O traçado preto, sobreposto às trajetórias, indicam o intervalo de interação entre o vórtice e a boia. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas.

o mapa de vorticidade correspondente (figura 34-A), onde o núcleo de vorticidade apresenta um gradiente elevado da RV na sua periferia. Anterior a este momento, o vórtice sofre alguns alongamentos (como o exemplo visível na figura 33-C) ao mesmo tempo que se dá a coalescência com outras estruturas. Neste trajeto a anomalia do raio (figura 32-A) apresenta valores negativos apenas devido ao facto do raio ser bastante inferior quando comparado com a média no total do percurso. A direção de propagação deste ciclone apresenta alguma variação, sendo a sua velocidade de translação (figura 31) bastante irregular na primeira parte do seu trajeto. No percurso em que é acompanhado pela boia de superfície, a sua velocidade é mais constante, existindo apenas uma pequena quebra aquando da passagem sobre a crista. Esta diminuição na velocidade está relacionada com o processo de separação desta estrutura nessa região, existindo um aumento da anomalia do raio (visível na figura 32-A), sendo este originado pelo facto da deteção considerar as estruturas resultantes da separação como um todo. No mesmo intervalo de tempo existe uma diminuição na anomalia da amplitude devida à deteção do vórtice ser realizada no seu centro, apresentando este um valor baixo (muito possivelmente também pequeno nos mapas de SSH). É possível observar na figura 33-D que o vórtice possui menos dois máximos no interior do seu diâmetro, sendo estes também visíveis na figura 34-B, onde se observam dois núcleos de vorticidade. Os contornos destes núcleos de vorticidade são pouco definidos, refletindo o processo de separação. A velocidade de rotação da boia aquando do acompanhamento do vórtice é cerca de 19.3cm/s sendo superior em cerca de 3cm/s à velocidade de rotação do vórtice (figura 32-B), sendo no entanto as

¹⁷ Visível nos vídeos dos mapas de SLA, podendo estas não ser visíveis nos mapas de SSH.

suas variações semelhantes. Esta diferença pode ser explicada mais uma vez pela componente ageostrófica do movimento. A trajetória da boia forma 6 *loops* no seu trajeto conjunto com o ciclone, traduzindo assim a rotação de uma estrutura coerente, sendo perdida pelo vórtice aquando da separação deste sobre a crista. Ao aproximar-se do flanco Este da MAR o ciclone perde intensidade, traduzida pela diminuição da anomalia da amplitude (figura 32-A). Já sobre o flanco Oeste (figura 32-A), após o dia 31/10/1994) existe um aumento desta refletindo a intensificação da estrutura, ao mesmo tempo que existe uma quebra abrupta na anomalia do raio traduzindo esta o facto da deteção seguir apenas uma das estruturas resultantes da separação o vórtice. A passagem do vórtice sobre a crista, está de acordo com a análise da conservação da vorticidade potencial: ao considerar apenas o balanço entre a vorticidade relativa e a profundidade do vórtice, verifica-se que aquando da passagem, ao existir uma contração do vórtice, a RV diminui, resultando na diminuição da velocidade de rotação (figura 32-B), sendo esta acompanhada pela diminuição da amplitude e aumento do raio (figura 32-A). Sobre o flanco Oeste verifica-se o inverso. Após a passagem total sobre a crista o ciclone sofre um alongamento bastante acentuado na direção SE-NW (figura 33-E), tornando-se posteriormente bastante extenso com uma direção aproximadamente zonal. Este alongamento é também visível no mapa de vorticidade (figura 34-C), onde os contornos de vorticidade apresentam um gradiente mais acentuado de vorticidade na direção NE-SW, refletindo assim o alongamento na sua direção perpendicular. A deteção deste vórtice é terminada prematuramente, sendo que o restante do seu percurso não foi analisado por se encontrar fora do domínio da região de estudo.

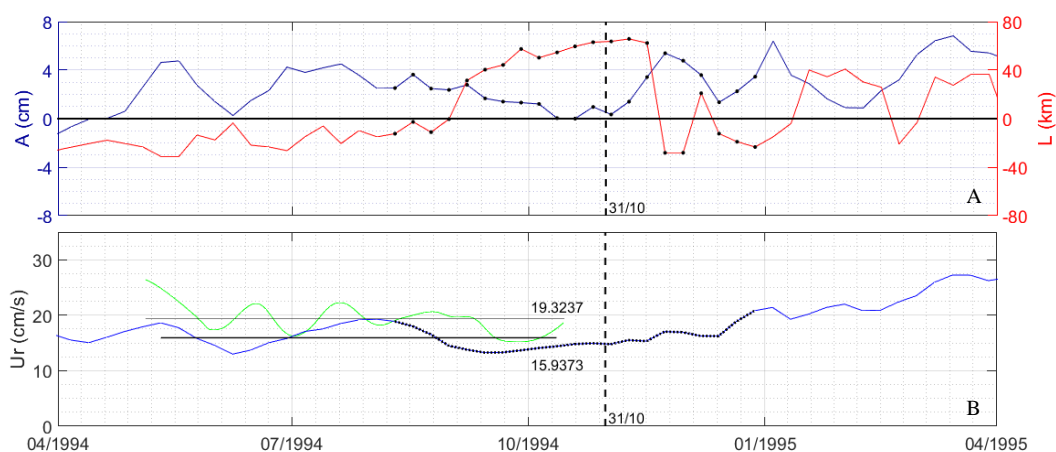


Figura 32 - A) Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice. Os pontos pretos representam os tempos de interação com a crista. B) Velocidade de rotação do vórtice ao longo do seu trajeto (azul) e velocidade de rotação da boia de superfície (verde). As linhas horizontais cinzentas representam as respetivas médias das velocidades (os valores destas encontram-se sobre a linha). Em A) e B), a linha a tracejado vertical representa a data de interseção da trajetória do vórtice com o eixo central da crista.

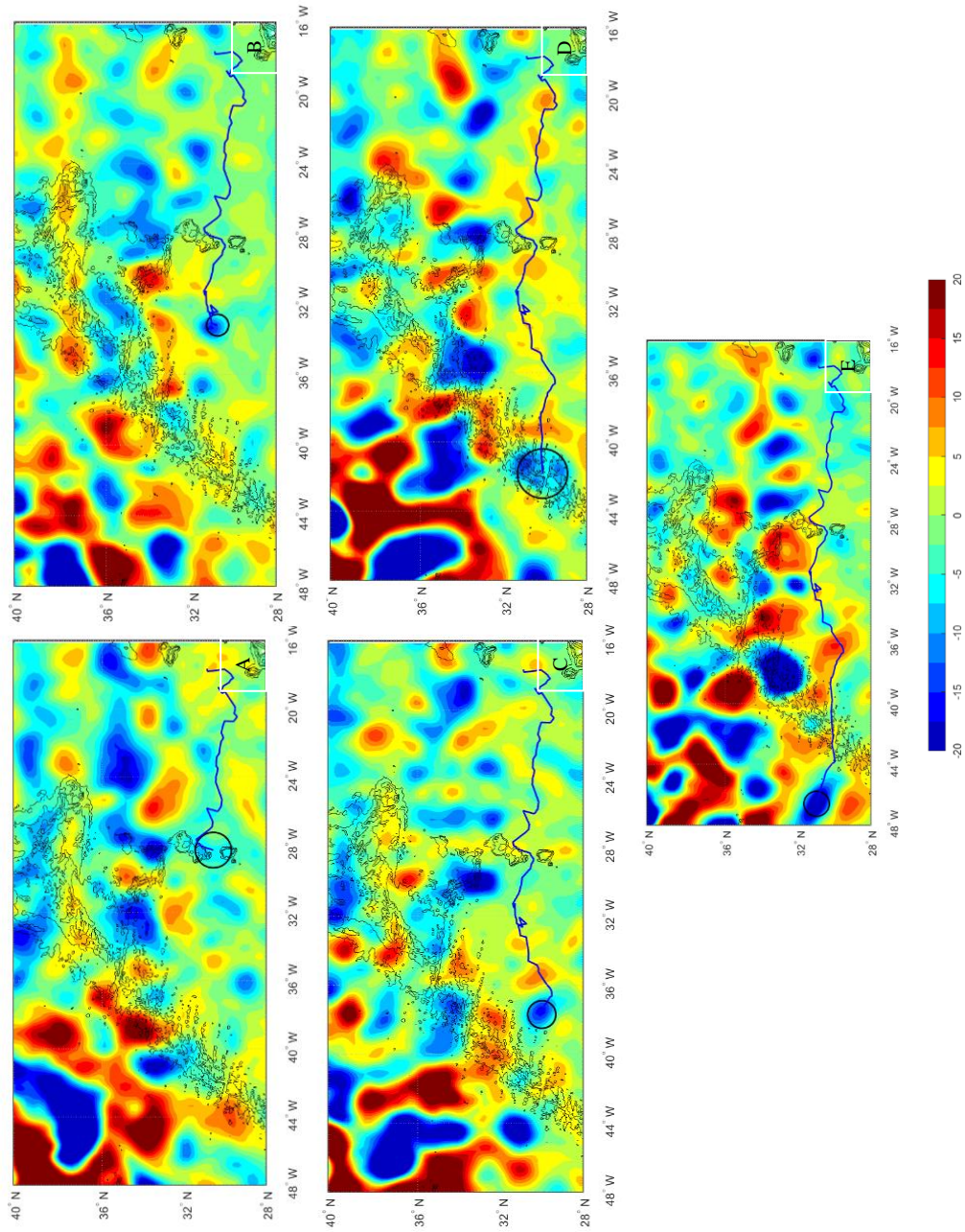


Figura 33 - Mapas de SLA para os dias 12/09/1993-A; 01/03/1994-B; 13/07/1994-C; 31/10/1994-D; 01/03/1995-E. A linha a azul representa a trajetória do ciclone e as circunferências pretas os raios dos vórtices. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.

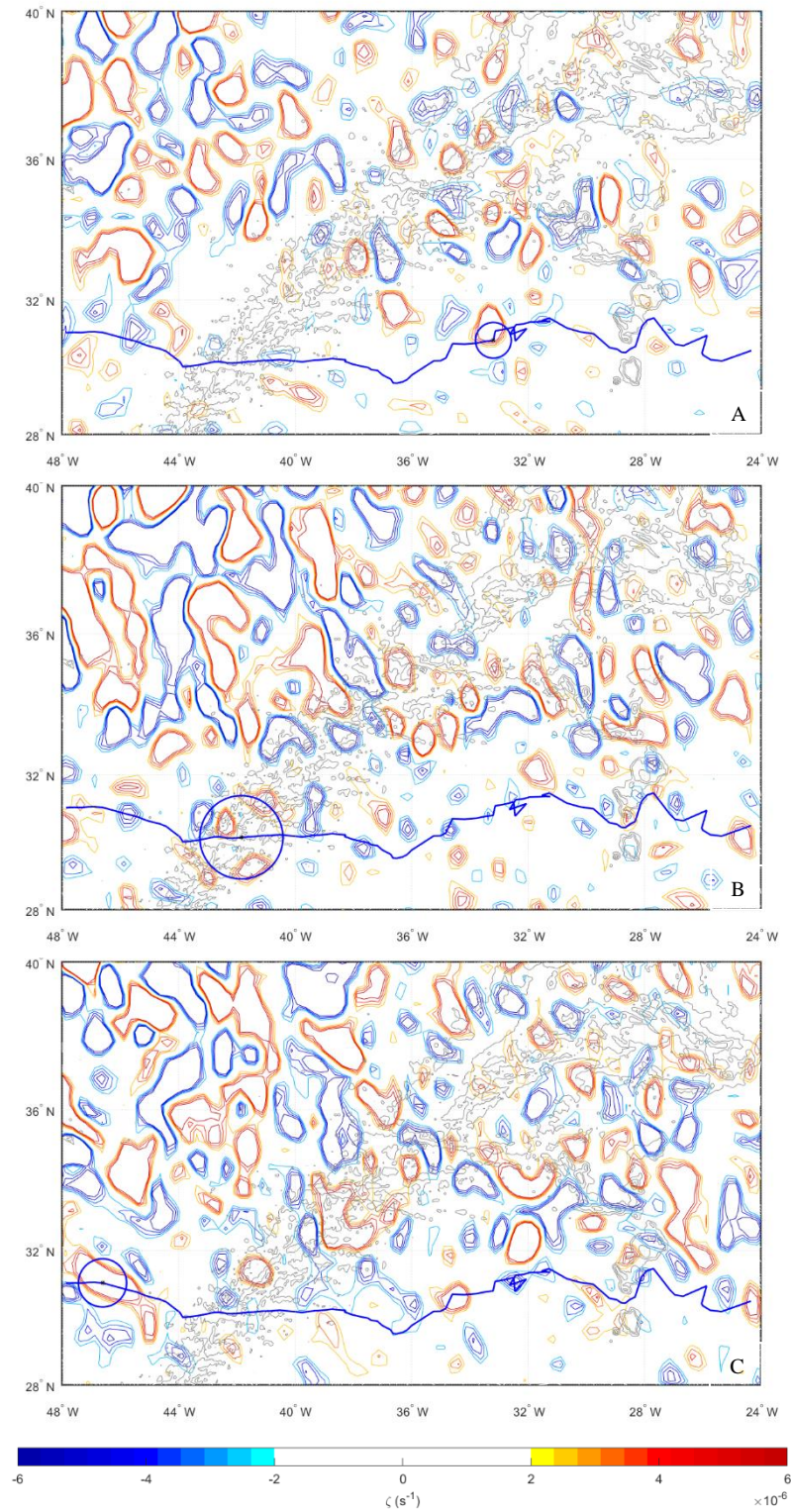


Figura 34 - Mapas de vorticidade relativa para os dias 01/03/1994-A; 31/10/1994-B e 01/03/1995-C. A linha a azul representa a trajetória do anticiclone e a circunferência azul o raio do vórtice.

3.3.4 #3170 e #3263

Este caso de estudo pretende mostrar uma interação pouco comum e interessante detetada na região de estudo: a migração longa de dois vórtices: **#3170** e **#3263**, cada um deles sobre um dos flancos da MAR, e a sua coalescência após a passagem do primeiro sobre a crista. Estes vórtices têm ambos o seu início de deteção sobre a crista às latitudes aproximadas de 37° e 38°N, respetivamente (figura 35 e figura 37-A e B), sendo o vórtice #3263 detetado 5 meses após o #3170. O vórtice #3170 sofre uma sequência de

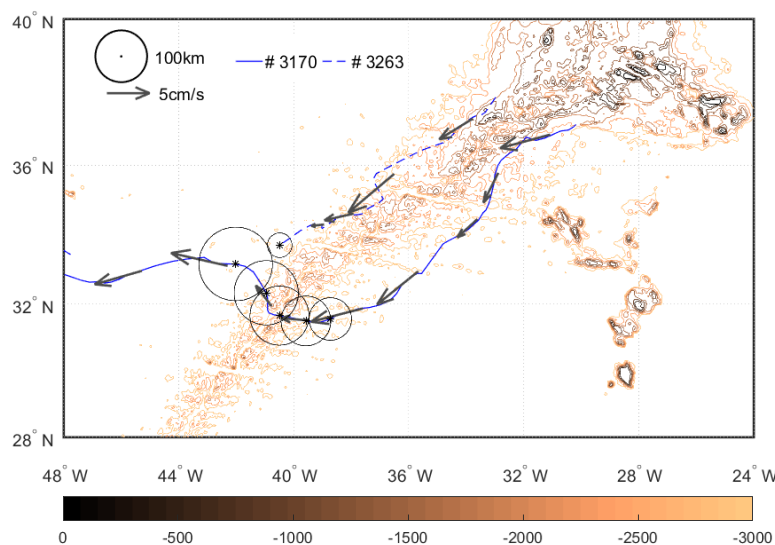


Figura 35 - Mapa das trajetórias dos dois ciclones. As circunferências pretas representam os raios dos vórtices e os asteriscos os seus centros. A sequência de raios pretende representar a coalescência dos dois vórtices. As batimétricas encontram-se representadas a cada 500m. As setas representam a velocidade de translação média correspondente a cada 8 semanas. O valor de 100km corresponde ao raio do círculo.

alongamentos no seu trajeto inicial, primeiro na direção SE-NW e posteriormente na direção perpendicular, sendo este último mais pronunciado (figura 37-B). Analisando o mapa correspondente de vorticidade relativa (figura 38-A) é possível observar que os contornos desta estrutura são pouco definidos principalmente na sua região Norte, formando um filamento de vorticidade. Na mesma figura é interessante notar que o vórtice #3263 apresenta um núcleo razoavelmente definido, com alguma assimetria, enquanto no mapa de SLA o seu contorno é bastante difuso (figura 37-B). No início do seu trajeto este vórtice apresenta uma dimensão e amplitude bastante reduzida, existindo mesmo um salto¹⁸ na deteção entre estruturas, traduzido na figura 35 pela velocidade de translação elevada na primeira metade do seu percurso. Na figura 36-A é visível um máximo de anomalia do raio após o dia 01/07/2006, correspondente ao alongamento máximo do vórtice, já referido. Este alongamento provoca a sua destabilização resultando na separação em duas estruturas de menor dimensão, sendo o início deste processo visível na figura 37-C. Neste momento, o vórtice #3263 é alimentado por um processo de streamer na direção SE-NW, intensificando-se ao mesmo tempo que adquire uma estrutura mais coerente, traduzido na figura 36-B pelo aumento das anomalias do raio e da amplitude a partir do dia 01/07/2006. Após a separação do vórtice #3170, a deteção segue apenas a estrutura resultante cuja amplitude apresenta valores mais elevados (figura 37-D). Este vórtice apresenta uma forma mais definida, visível também no mapa de vorticidade (figura 38-B), apresentando os contornos do seu núcleo um gradiente de RV bastante elevado na sua periferia. Por outro lado, o vórtice #3263 tem os seus contornos pouco definidos com alguma assimetria. Apesar da deteção do vórtice #3263 ser

¹⁸ O salto visível nos vídeos pode estar relacionado com a diferença de resolução entre a SSH e a SLA.

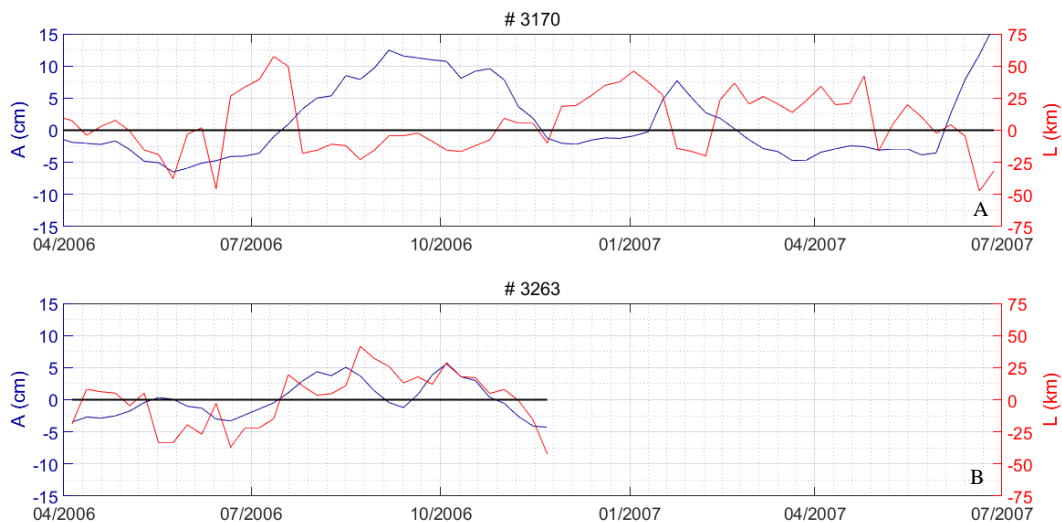


Figura 36 - Anomalia do raio (vermelho) e da amplitude (azul) do vórtice para os vórtices #3170 (A) e #3263 (B).

prematuramente interrompida (último dia de detecção representado na figura 37-F), é visível nos vídeos a continuação de propagação desta estrutura ao longo do flanco Este, até ao momento em coalesce totalmente com o vórtice #3170. Na figura 38-D é bem visível o processo de coalescência dos dois vórtices, apresentando ambos um grande alongamento dos seus contornos de RV, tendo estes valores de gradiente elevados, principalmente o vórtice #3263. Observa-se também o filamento de vorticidade que une os dois vórtices. Esta coalescência tem o seu início por volta do dia 10/11/2006 (figura 37-E), estando este processo representado na figura 36-A pelo aumento da anomalia do raio do vórtice após o dia 01/10/2006, em conjunto com uma diminuição da anomalia da amplitude. Findo este processo de coalescência, o vórtice #3170 segue o seu trajeto, cruzando totalmente a crista, seguindo para Oeste, com valores de velocidade de translação superiores a 5cm/s (figura 35). Esta velocidade, aquando da sua migração ao longo do flanco Este apresenta valores elevados, refletindo o salto na detecção resultante do seu alongamento extenso sobre a crista. É possível também notar que aquando da coalescência com o vórtice #3263, a sua velocidade de translação é bastante menor. O vórtice mantém-se coerente até ao momento em que a sua trajetória ultrapassa o domínio da região estudada.

Foram analisadas algumas ideias que permitissem explicar o porquê do vórtice #3263 se propagar, aparentemente, na direção contrária à resultante, tendo em conta o efeito do β -topográfico, mas infelizmente no decorrer deste trabalho não foi possível encontrar uma justificação para esta ocorrência.

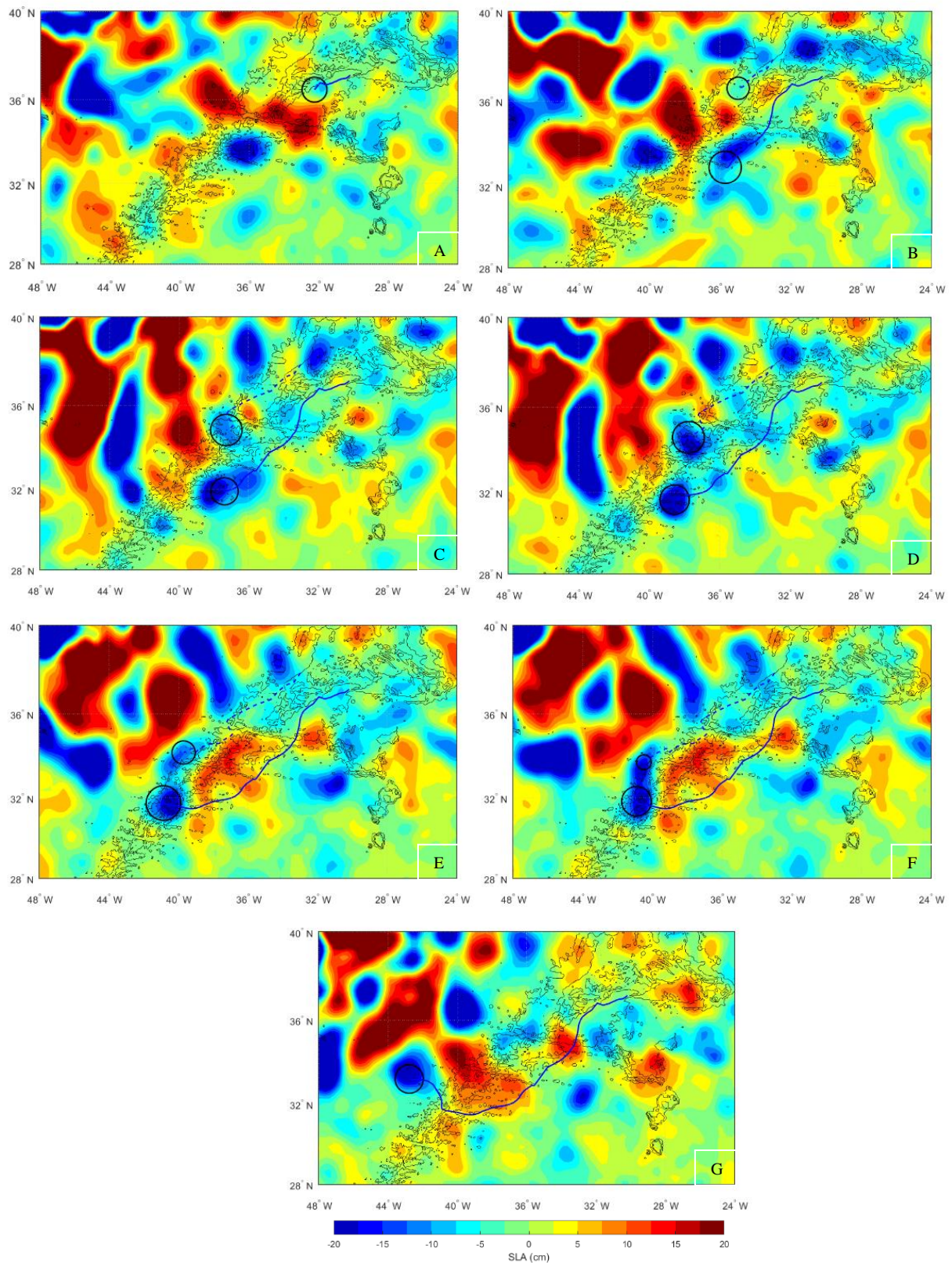


Figura 37- Mapas de SLA para os dias 05/01/2006-A; 29/05/2006-B; 22/07/2006-C; 13/08/2006-D; 10/11/2006-E; 22/11/2006-F e 22/01/2007-G. A linha a azul representa a trajetória do ciclone #3170 e a linha azul a tracejado a do ciclone #3263. As circunferências pretas os raios dos mesmos. A escala da SLA encontra-se saturada acima dos 20cm e abaixo dos -20cm.

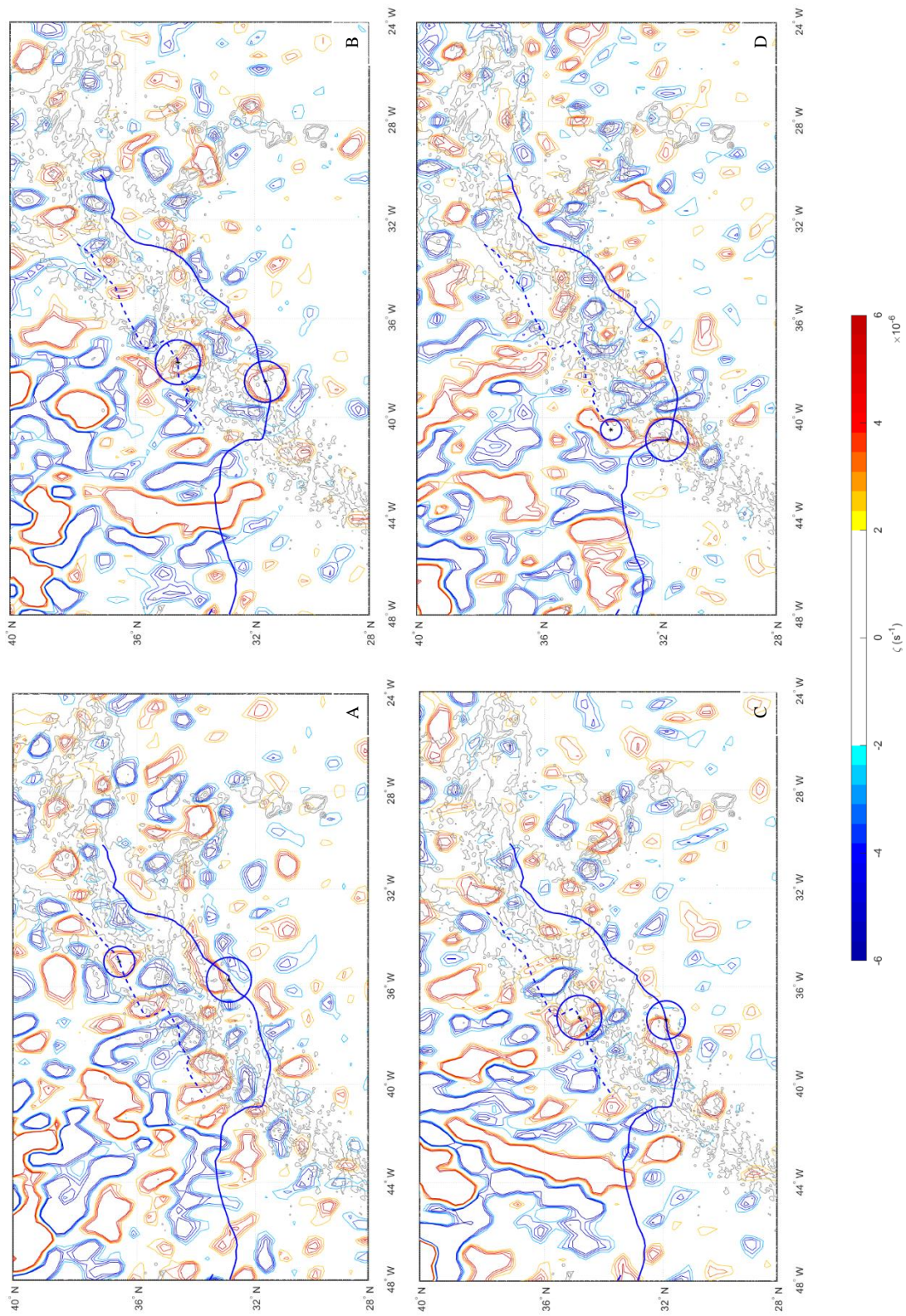


Figura 38 - Mapas de vorticidade relativa para os dias 29/05/2006-A; 13/08/2006-B; 22/11/2006-C e 22/01/2007-D. A linha azul representa a trajetória do ciclone #3170 e a linha azul tracejada a do ciclone #3263. As circunferências pretas os raios dos mesmos.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados alguns aspetos da dinâmica das estruturas de mesoescala, associadas à AzC, e sua interação com a MAR, utilizando altimetria de satélite e grandezas derivadas desta. Numa primeira abordagem foi realizada uma caracterização da região global de estudo, tendo em conta os dados de trajetórias de vórtices disponíveis, para o período entre 04/10/1992 e 04/04/2012. Assim, foram detetados 1925 vórtices, entre os quais 1033 ciclones e 927 anticiclones, com um tempo de propagação superior a 8 semanas. Para além da confirmação dos corredores de vórtices referidos na literatura (Corredor de Vórtices das Canárias e da Madeira), existe um outro, junto à falha Atlantis cuja origem é desconhecida. Ao contrário destas regiões, de dinâmica intensa, existem zonas onde o número de trajetórias de vórtices é escasso ou mesmo inexistente - desertos de vórtices. Salienta-se a faixa latitudinal dos 32°N e a região centrada aos 30°N, 26°W onde as trajetórias de anticiclones são praticamente inexistentes. Filtrando os dados tendo em conta apenas os vórtices cujo início de deteção é realizado no interior da região associada ao eixo principal da corrente, foram contabilizadas 461 estruturas entre os quais 249 ciclones e 212 anticiclones. Estes vórtices propagam-se de duas formas principais distintas aquando da sua interação com a crista: passando sobre esta ou migrando ao longo do seu flanco. Este existindo por vezes uma combinação de ambas. Do total de vórtices detetados nesta região apenas 13% cruzam a crista, sendo que destes, metade têm início de deteção já sobre o seu flanco Este, e 7% migram ao longo desta (tabela 6).

Tabela 6 - Número de vórtices que interagem com a crista

	Do total de vórtices detetados (461)							
	Sem cruzar			Sem migrar			Total	
			# Vórtices		Total	# Vórtices		
Cruzam	-			Ciclones	19	38	58	13%
				Anticiclones	19			
			# Vórtices	Total				
Migram	Ciclones	7	11	-			31	7%
	Anticiclones	4						
Vórtices que cruzam e migram							20	4%
Total de vórtices que interagem com a MAR							69	15%

A faixa latitudinal de passagem dos anticiclones é mais restrita, existindo, no entanto, alguns lugares preferenciais para esta: as regiões a norte e a sul da falha de Hayes. No que respeita ao modo como a passagem sobre a MAR é realizada, esta conta na sua maioria com a passagem sob a forma de estrutura coerente, principalmente no caso dos ciclones. Regra geral os anticiclones apresentam uma forma menos definida, pelo que a definição de passagem como estrutura coerente pode, algumas vezes, não corresponder totalmente à realidade. Foram realizadas algumas tentativas de estabelecer uma associação/correspondência entre os diversos processos sofridos pelos vórtices durante a sua passagem sobre a MAR com as variações de amplitude, raio e velocidade de rotação associadas a cada um. No entanto, devido à grande dinâmica/interação de estruturas nesta região, não foi possível estabelecer esta relação. Os casos de estudo analisados mostraram que a definição de uma estrutura está bastante dependente da resolução dos mapas a partir dos quais estas são detetadas, bem como das escalas escolhidas para a sua representação. Neste trabalho foi detetada uma interação interessante e pouco

comum: a migração de estruturas ao longo do flanco Oeste da MAR, aparentemente no sentido oposto àquele definido considerando apenas o efeito do β -topográfico. Como conclusão final pode dizer-se que este trabalho constituiu um primeiro passo para o conhecimento da dinâmica da região estudada e que, apesar das dificuldades encontradas por vezes na individualização das estruturas detetadas, foi possível tipificar tanto as formas da sua interação com a crista, como do modo de propagação sobre ela.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, A., Peliz, A., Pires, A. and Le Cann, B., 2011: *Zonal structure of the mean flow and eddies in the Azores Current system*, Journal of Geophysical Research, 116
- Alves, M. and Verdière, A., 1999: *Instability Dynamics of a Subtropical Jet and Applications to the Azores Front Current System: Eddy-Driven Mean Flow*. Journal Physical Oceanography, 29, 837–864
- Alves, M., Gaillard, F., Sparrow, M., Knoll, M. and Giraud, S., 2002: *Circulation patterns and transport of the Azores Front-Current system*, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, Volume 49, Issue 19, Pages 3983-4002
- Carton, X., 2001: *Hydrodynamical modeling of oceanic vortices*, Surveys in Geophysics 22: 179
- Chelton, D., Schlax, M. and Samelson, R., 2011: *Global observations of nonlinear mesoscale eddies*, Progress in Oceanography, Volume 91, Issue 2, Pages 167-216
- Cheng, Y., Ho, C., Zheng, Q. and Kuo, N., 2014: *Statistical Characteristics of Mesoscale Eddies in the North Pacific Derived from Satellite Altimetry*, Remote Sensing, 6, 5164-5183.
- Gould, W., 1985: *Physical oceanography of the Azores front*, Progress in Oceanography, Volume 14, Pages 167-190
- Holton, J., 1993: *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Academic Press, Inc. Second Edition. 391 Pp.
- Isern-Fontanet, J., García-Ladona, E. and Font, J., 2003: *Identification of Marine Eddies from Altimetric Maps*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20, 772–778
- Käse, R. and Siedler, G., 1982: *Meandering of the subtropical front south-east of the Azores*, Nature, 300, 245-246
- Klein, B. and Siedler, G., 1989: *On the origin of the Azores Current*, Journal of Geophysical Research, 94, 6159–6168
- Lázaro, C., Juliano, M., Fernandes, M., 2013: *Semi-automatic determination of the Azores Current axis using satellite altimetry: Application to the study of the current variability during 1995–2006*, Advances in Space Research, Volume 51, Issue 11, Pages 2155-2170
- Niiler, P., Maximenko, N. and McWilliams, J., 2003: *Dynamically balanced absolute sea level of the global ocean derived from near-surface velocity observations*, Geophysical Research Letter, 30, 2164

Pingree, R. and Sinha, B., 1998: *Dynamic Topography (ERS-1/2 and Seatruth) of Subtropical Ring (Storm 0) in the Storm Corridor (32–34°N, Eastern Basin, North Atlantic Ocean)*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 78, 351–376.

Pingree, R. and Sinha, B., 2001: *Westward moving waves or eddies (Storms) on the Subtropical/Azores Front near 32.5°N? Interpretation of the Eulerian currents and temperature records at moorings 155 (35.5°W) and 156 (34.4°W)*, Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 29, 239–276

Sangrà, P., *et al.*, 2009: *The Canary Eddy Corridor: A major pathway for long-lived eddies in the subtropical North Atlantic*, Deep Sea Research, Part I, 56, 2100–2114.

Sy, A., 1988: *Investigation of large-scale circulation patterns in the central North Atlantic: The North Atlantic Current, the Azores Current, and the Mediterranean Water plume in the area of the Mid-Atlantic Ridge*, Deep Sea Research, Part I, 35, 383–413

Richardson, P., 1983: *Eddy kinetic energy in the North Atlantic from Surface drifters*, Journal of Geophysical Research, 88, 4355–4367.

Van Geffen, J. and Davies, P., 2000: *A monopolar vortex encounters a north–south ridge or trough*, Fluid Dynamics Research, Volume 26, Issue 3, Pages 157–179

Volkov, D., and Fu L., 2011: *Interannual variability of the Azores Current strength and eddy energy in relation to atmospheric forcing*, Journal of Geophysical Research, 116, C11011

ANEXOS

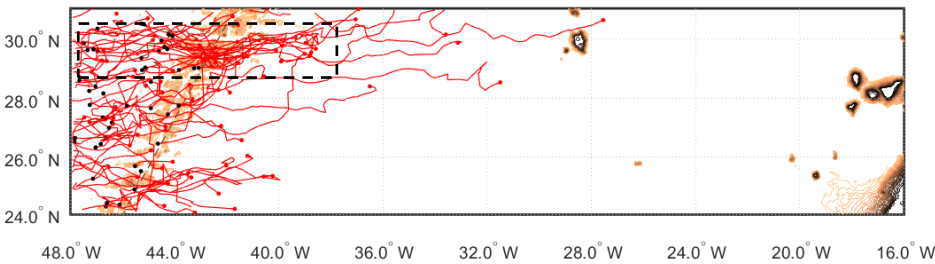


Figura 39 - Trajetórias de anticiclones na região da falha Atlantis.

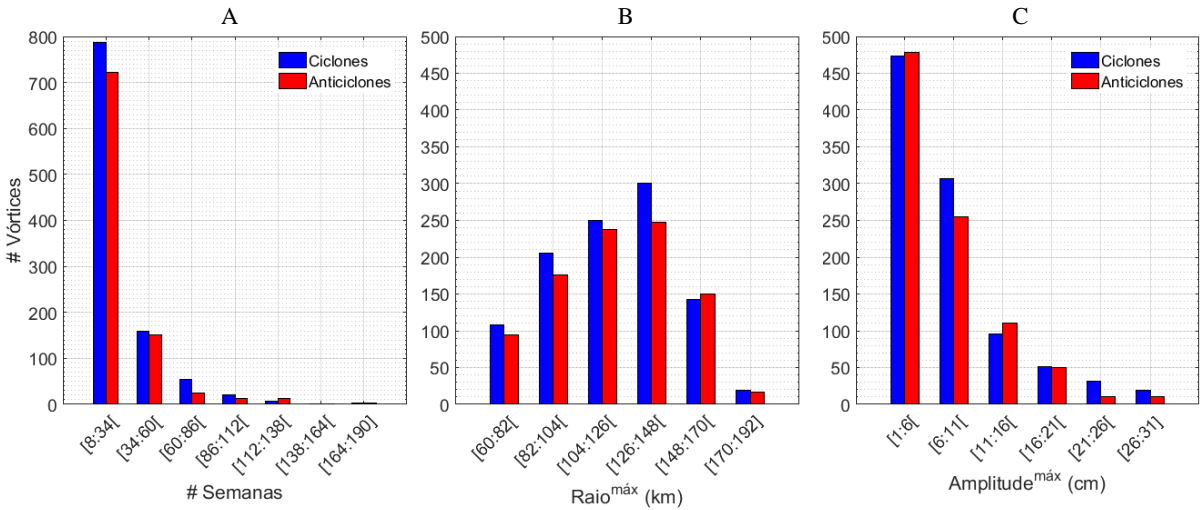


Figura 40 - A) Tempo de trajetória, B) raio máximo e C) amplitude máxima obtidos em cada uma das trajetórias dos vórtices detetados na região de estudo.

Tabela 7 - Características dos vórtices que se encontram fora dos limites dos intervalos dos histogramas da figura 40.

		Raio ^{máx} (km)		Amplitude ^{máx} (cm)
		< 60	> 192	> 31
# Vórtices	Ciclones	4	3	56
	Anticiclones	4	-	12
Total		8	3	68

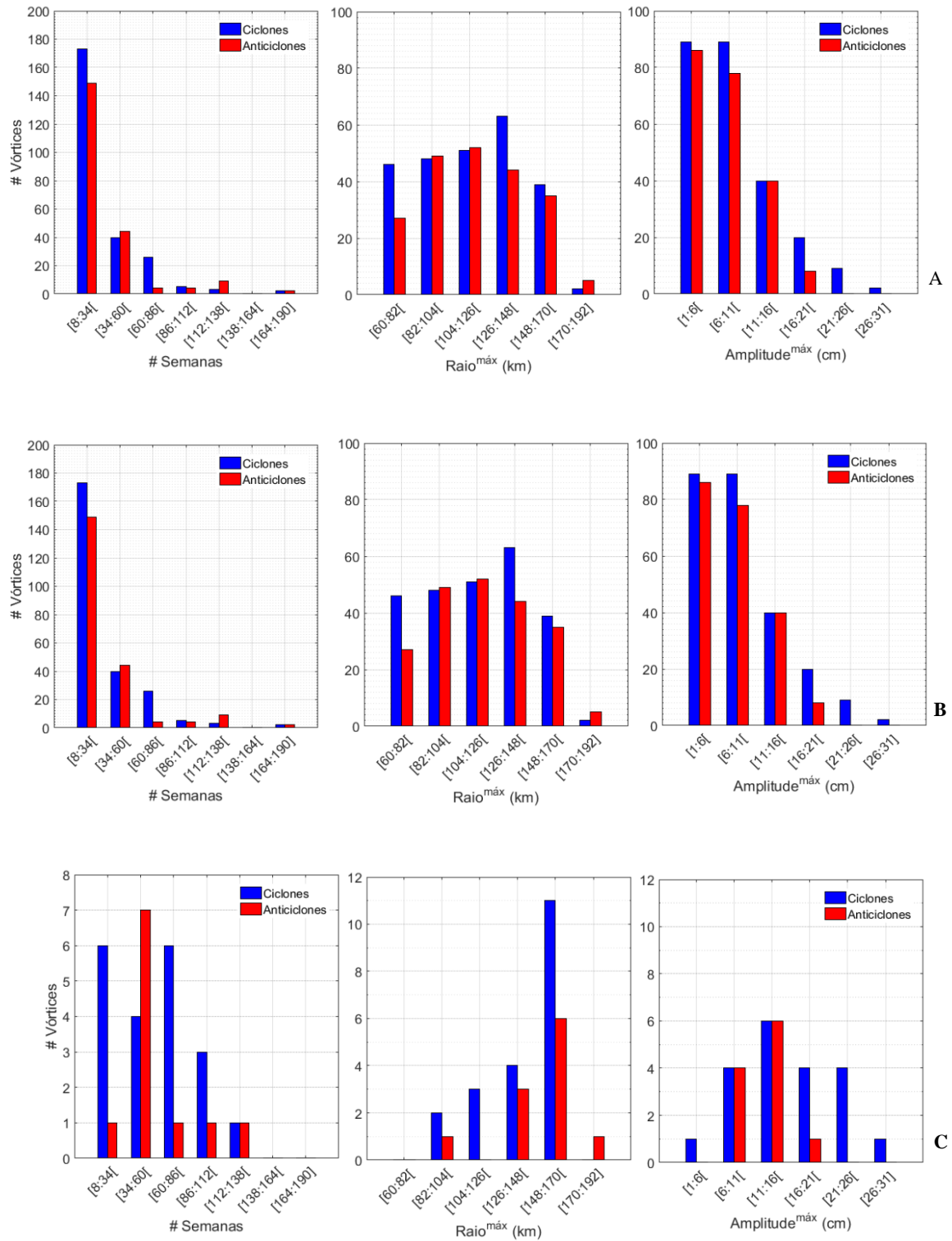


Figura 41 - Tempo de trajetória (esquerda). Raio máximo (centro) e amplitude máxima (direita) obtidos em cada uma das trajetórias dos vórtices detetados na região da AzC (A), dos vórtices que cruzam a MAR (B) e dos vórtices que migram ao longo desta (C).